

Sylviculture et protection des sols et des eaux

J Ranger ¹, E Dambrine ¹, M Nicolas ², Q Ponette³, L Augusto ⁴,
C Nys ¹, A Legout ¹, A Gavaland ⁵, A Berthelot ⁶, E Cacot ⁶, JM
Ottorini ⁸, JP Laclau ⁷, L Saint André ⁷, J Bouchon ⁸
Et leurs Equipes Techniques

- 1- BEF INRA Nancy
- 2- OND R&D Fontainebleau
- 3- Sylviculture UC Louvain la Neuve
- 4- TCEM INRA Bordeaux
- 5- Dynafor INRA Toulouse
- 6- FCBA Dijon et Limoges
- 7- Cirad Persyst
- 8- Lerfob INRA Nancy

Atelier Régéfor Juin 2009

Protection des sols

Le contexte des sols forestiers

Les sols forestiers sont dans une région donnée les moins convenables pour l'agriculture (Badeau et al., 1999)

Ils ont subi des pratiques appauvrissantes : écobuage, soutrage, récoltes complètes en régime de taillis pour le bois énergie ou pour le feuillardage dans le Massif central, le Morvan les Ardennes etc..

Ne redécouvrons pas le monde....

Ils sont rarement enrichis par fertilisation et/ou amendements, mais peuvent contenir un reliquat de fertilité qu'il faut distinguer de leur statut naturel (cas des sols de déprise agricole)

Rappel sur la disponibilité des éléments nutritifs dans les sols forestiers

1-**Capacité à fournir** les éléments :

- Les réserves minérales inaltérées des sols forestiers sont souvent limitées et toujours non renouvelables (système fini)
- En climat tempéré, les minéraux primaires très altérables ont disparu, les minéraux restant, plus résistants, conduisent à des flux d'altération limités

2 **Capacité à retenir** les éléments :

- Les cations nutritifs (Ca, Mg voire K) ne sont pas très compétitifs pour se maintenir sur les sites actifs d'échange du sol en milieu acide
- Les anions sont adsorbés de manière \pm spécifique
- Les supports de la fertilité actuelle, minéraux argileux, oxydes, MOS sont vulnérables (dissolution, aluminisation, minéralisation.....)
- La séquestration physique peut jouer un rôle important

3- **Capacité de l'écosystème à recycler** les éléments

- la végétation est adaptée à cet état de fait
- Dans les sols de fertilité moyenne à faible, la nutrition minérale des peuplements, et sa pérennité dépend beaucoup plus d'un flux que d'une réserve

Indicateur qualité intéressant pour toutes les fonctions du sol

Outils pour le diagnostic

1- Outils classiques et opérationnels

- diagnostic foliaire
- guide sur l'autécologie des essences
- diagnostic sol
- outil composite simple (guide ADEME)

2- Outils sophistiqués et utilisables dans des sites instrumentés et suivis sur le moyen terme (système de référence)

- bilans de fertilité

3- Simulateurs et modèles

4- Cartes des sensibilités, indépendantes ou cumulées (fertilité, compaction.....)..... aux bonnes échelles

Diagnostic foliaire (Bonneau, 1995)

	N			P			K			Ca			Mg		
	carence	niveau critique	optimum	carence	niveau critique	optimum	carence	niveau critique	optimum	carence	niveau critique	optimum	carence	niveau critique	optimum
Pin laricio	0,8-1,0	1-1,2	1,2-1,5		0,08-0,1	0,12-0,15	0,2-0,3	0,3-0,4	0,5			0,1-0,12			
Epicea	1-1,3	1,3-1,5	1,5-1,9	0,1-0,15	0,15	0,18-0,21	0,3-0,4	0,4-0,5	0,6-0,8	0,05-0,1		0,2-0,5	0,06		0,10-0,14
Douglas	1-1,3	1,3-1,5	1,5-1,9	0,1-0,15	0,15	0,15-0,18	0,3-0,4	0,4-0,5	0,6-0,8	0,05-0,1		0,2-0,5	0,06		0,10-0,14
Hêtre Chênes			2-2,3			0,22-0,30			1,5-1,7			0,5-0,8	0,1		0,2

Normes de fertilité des sols (d'après M. Bonneau 1995 Fertilisation des forêts Ed ENGREF)

Stock d'éléments sous forme d'oxyde pour une épaisseur de sol de 70 cm.

Feuillus

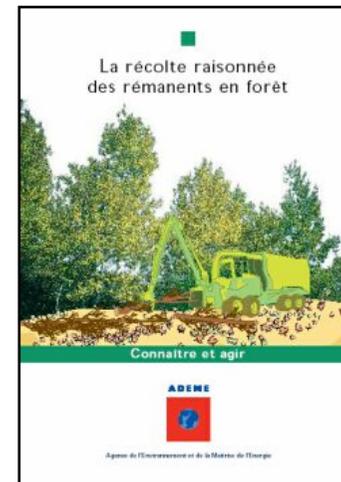
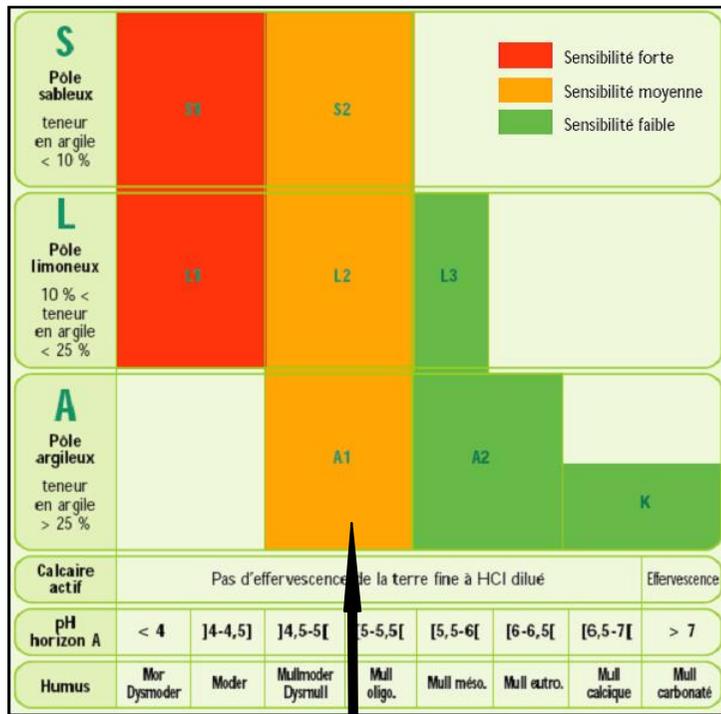
	Diagnostic	Norme de déficience (kg/ha)	Diagnostic	Norme de base (kg/ha)	Diagnostic	Norme de réserve (kg/ha)	Diagnostic
K ₂ O	Réserves très insuffisantes Risque de carence à court terme	406	Réserves insuffisantes Risque de carence à moyen terme	560	Réserves optimales par rapport aux besoins	900	Pas de problème
CaO		622,5		900		2500	
MgO		202,5		297		500	
P ₂ O ₅ *		420		600		1100	

Résineux

	Diagnostic	Norme de déficience (kg/ha)	Diagnostic	Norme de base (kg/ha)	Diagnostic	Norme de réserve (kg/ha)	Diagnostic
K ₂ O	Réserves très insuffisantes Risque de carence à court terme	290	Réserves insuffisantes Risque de carence à moyen terme	400	Réserves optimales par rapport aux besoins	650	Pas de problème
CaO		415		600		1650	
MgO		150		220		400	
P ₂ O ₅ *		280		400		750	

* P₂O₅ assimilable mesuré par la méthode Duchaufour.

Guide ADEME : diagnostic (Cacot et al., 2007)

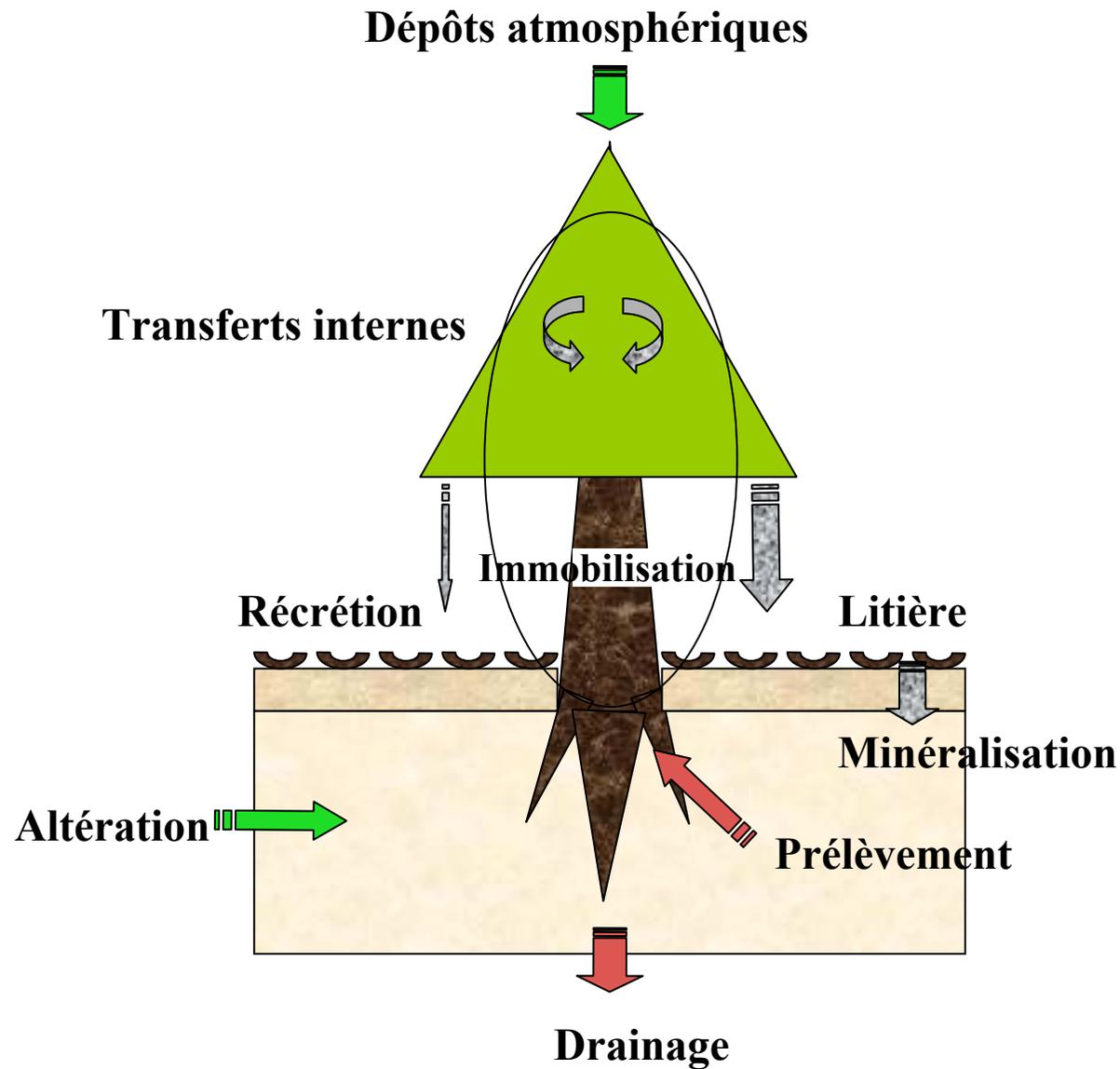


- Validation par les chantiers (Cacot et al., 2008)
 - Classe « moyennement sensibles » trop large ; devrait être divisée en deux pH=5

	Peuplement	Recommandations de l'ADEME sans fertilisation
Sols peu sensibles	Futaie	Récolte des rémanents ou d'arbres entiers 2 fois au maximum dans la vie du peuplement
	Taillis et TSF	Laisser au moins 15-20 ans entre 2 récoltes des arbres + rémanents (ou d'arbres entiers)
Sols moyennement sensibles	Epicéa commun	Récolte des rémanents ou d'arbres entiers 2 fois au maximum dans la vie du peuplement
	Futaie hors épicéa ou TSF en conversion	Récolte des rémanents ou d'arbres entiers 1 fois au maximum dans la vie du peuplement
Sols très sensibles	Taillis et TSF	Laisser au moins 30 ans entre 2 récoltes des arbres + rémanents (ou d'arbres entiers)
	Tous	Aucune récolte de rémanents ou d'arbres entiers

jamais d'exportation des feuillages ; compensation au delà de ces normes

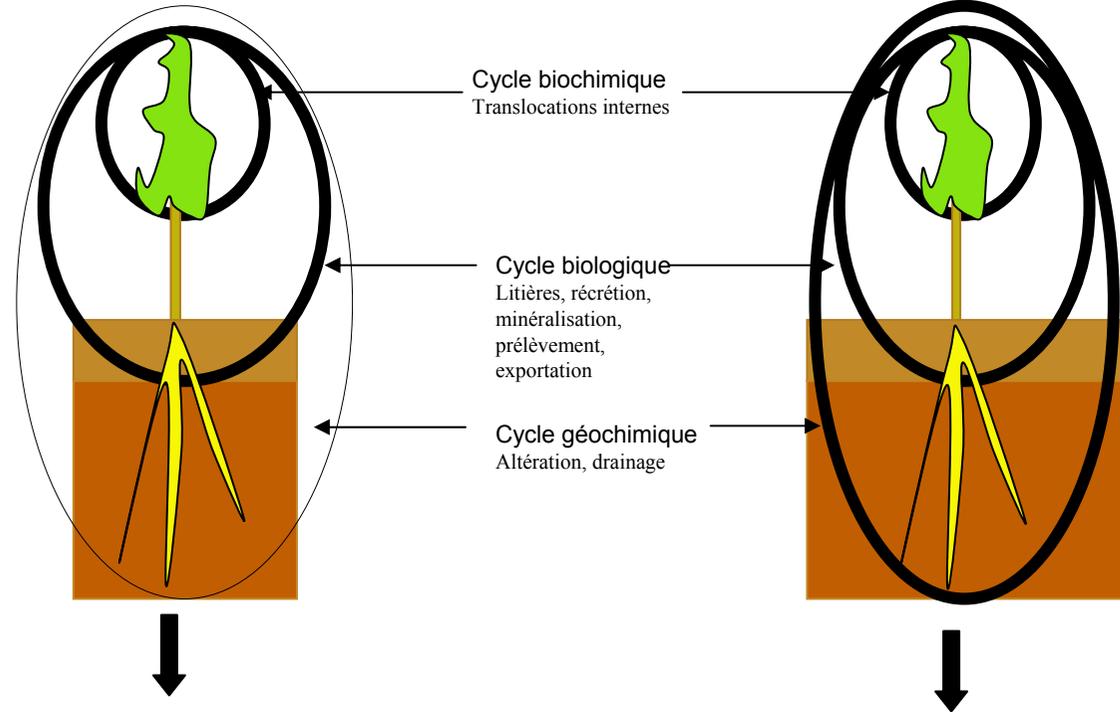
Flux - Cycles et Nutrition des peuplements forestiers



Le cycle **biogéochimique** correspond à un ensemble de processus qui tendent à **optimiser** l'efficacité des réserves du sol pour produire la biomasse et maintenir la qualité du sol....un volant limité d'éléments est en jeu.....mais le système est **vulnérable**

Type I - écosystèmes pauvres
: cycle BIOgéochimique

Type II - écosystèmes riches
: cycle bioGEOchimique



Type 1 : la fertilité du sol est précaire et dépend du recyclage puissant de type biologique en particulier ; rôle majeur des MOS et de la réactivité du sol minéral (Sols pauvres, typiquement sols tropicaux)

Type II : le sol peut supporter des aléas de gestion car sa capacité de restauration propre est importante (résilience) (sols riches en minéraux altérables)

Le système est d'autant plus vulnérable que les flux BIO prennent de l'importance (érosion, tassement, andainage...).

Un cycle biologique très efficient

(valeurs moyennes pour une plantation de 70 ans - Massif des Aiguillettes - Beaujolais)

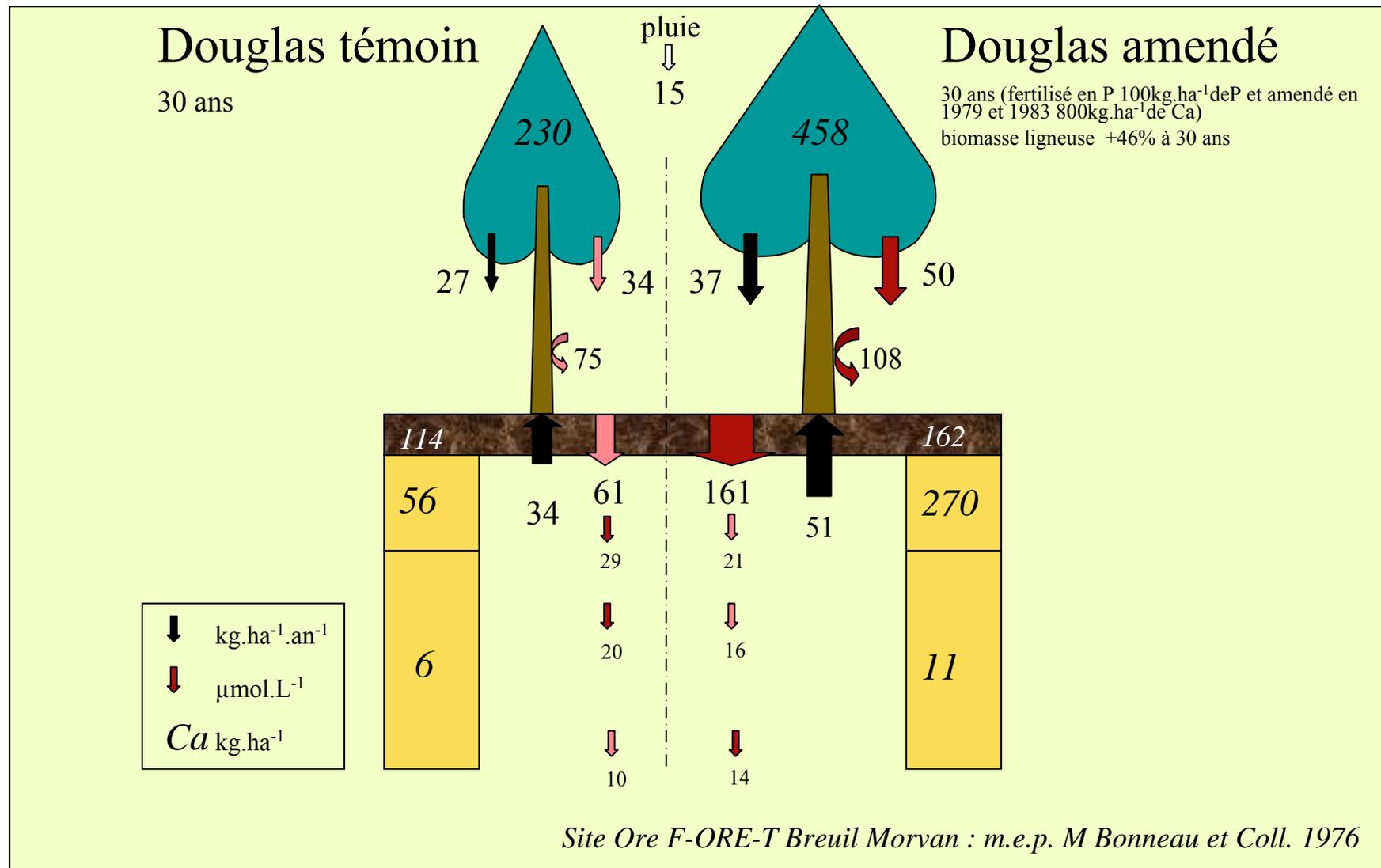
	N	P	K	Ca	Mg	
Demande totale	61,3	7,1	41,0	23,3	5,3	Forte
prélèvement	37,1	3,0	18,1	27,1	3,4	Limité en NPK
Immobilisation	5,7	0,4	2,3	4,9	0,4	Faible
Translocations internes	18,6	3,0	2,3	-8,6	0,6	Significatives
Litière	31,6	2,6	4,0	20,4	2,3	Fort % du prélèvement
Récréation	0,0	0,0	11,9	1,9	0,7	Significatif pour K
Absorption foliaire directe	6,9					

Translocations exprimées relativement au prélèvement	50%	100%	13%	0	17%
---	-----	------	-----	---	-----

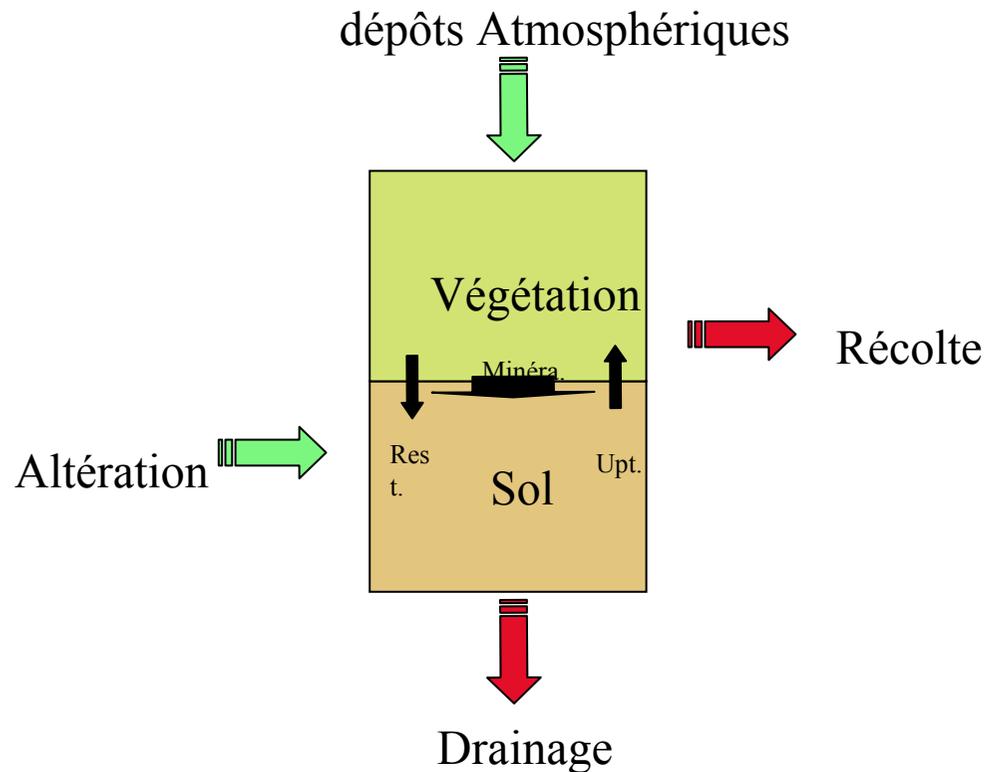
Réserves biodisponibles du sol 120 cm²	380	550	360	80	
Réserves totales du sol	8500	2300	359000	10200	66600

Pour Ca immobilisation
= réserves instantanées

Cycle de Ca sur sol pauvre et acide de Breuil (Morvan) Ranger et al., 2009



Le bilan de fertilité



Le bilan pour un système simple (terrain plat, sol sans nappe, sans fixateurs d'azote atmosphérique), établi pour les éléments disponibles à des échelles espace et temps fixées

$$\Delta \text{ éléments assimilables} = \text{Entrées [DA + Al]} - \text{Sorties [B + Dr]}$$

DA = dépôts atmosphériques totaux

Al = altération des minéraux

B = éléments exportés par les récoltes

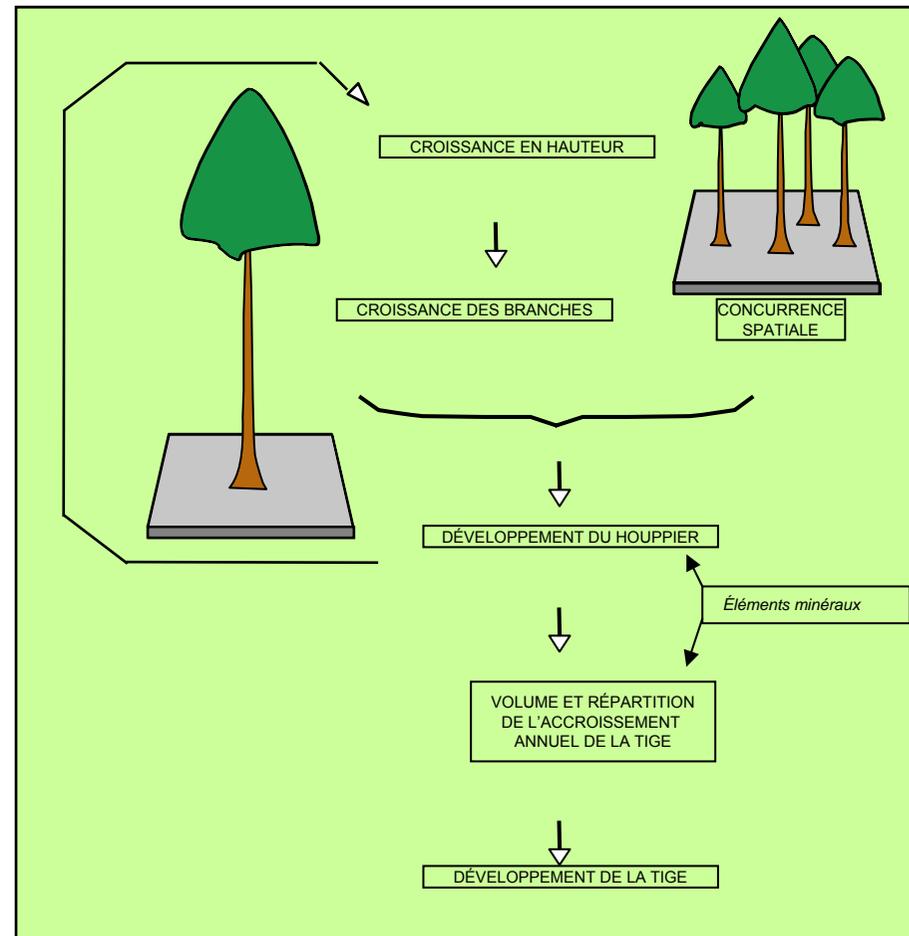
Dr = pertes par drainage

Contrôle des termes des bilans

- Apports atmosphériques : suivent le développement des peuplements seule une partie efficace ; effet de seuil sur le contrôle
- Altération : f (milieu et de l'âge du sol) ; prendre en compte la fertilité relictuelle
- Drainage : 1/prélèvement
- Exportations : f (essence, production, sylviculture, scénario d'exploitation)

Simulation : ex incorporation et exportation de C et d 'éléments nutritifs par les peuplements de Douglas
(Swanston et al., 2002)

		FD Maupuy (23)		FD Avants-Monts (34)		FD Ecouves (61)	
		estim	sim	estim	sim	estim	sim
N	Bois tige	102	109	118	111	140	136
	Écorce tige	61	57	116	117	60	68
	Bois branches	91	108	78	64	79	69
	Aiguilles	284	227	126	142	161	150
P	Bois tige	3.8	4.3	8.0	8.0	5.4	4.4
	Écorce tige	4.3	5.5	10.6	9.1	5.3	5.4
	Bois branches	7.2	10.0	7.2	5.9	8.3	6.4
	Aiguilles	12.3	13.3	8.0	8.3	9.3	8.8
K	Bois tige	27	32	39	45	40	30
	Écorce tige	23	29	47	44	25	27
	Bois branches	39	53	33	31	48	34
	Aiguilles	59	70	39	43	44	46
Ca	Bois tige	23	25	62	58	27	31
	Écorce tige	23	21	83	82	17	29
	Bois branches	47	65	66	39	45	42
	Aiguilles	62	64	54	41	47	43
Mg	Bois tige	5.2	5.6	8.8	9.25	6.7	6.1
	Écorce tige	3.8	4.4	9.2	8.8	3.9	4.4
	Bois branches	8.0	10.1	7.2	8.2	8.4	6.5
	Aiguilles	12.5	14.9	9.1	9.2	10.8	9.8

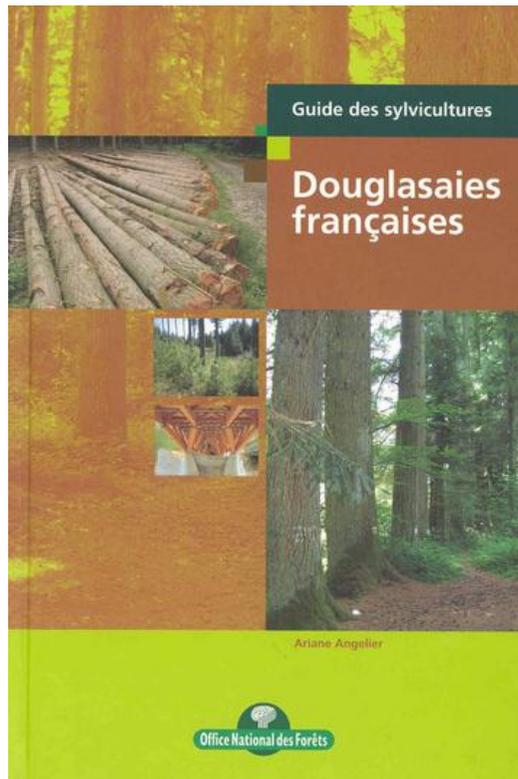


Simulateur SimCoP (Ottorini, 2002)

Test de simulation des minéralomasses de peuplements de Douglas

(estim = estimé par la méthode conventionnelle Ponette et al. 2001 ; sim = simulé par le modèle SimCop)

Sorties SIMCOP Utilisées par Ariane Angelier (Guide des sylvicultures Douglasaies françaises - 2007)



- Outils en cours de développement pour diverses essences, entre autres à partir des mesures effectuées depuis 30 ans

.....
(projet ANR EMERGE C Deleuze ONF Coord.)

- Intégration systémique en cours (projet Cirad-Inra)

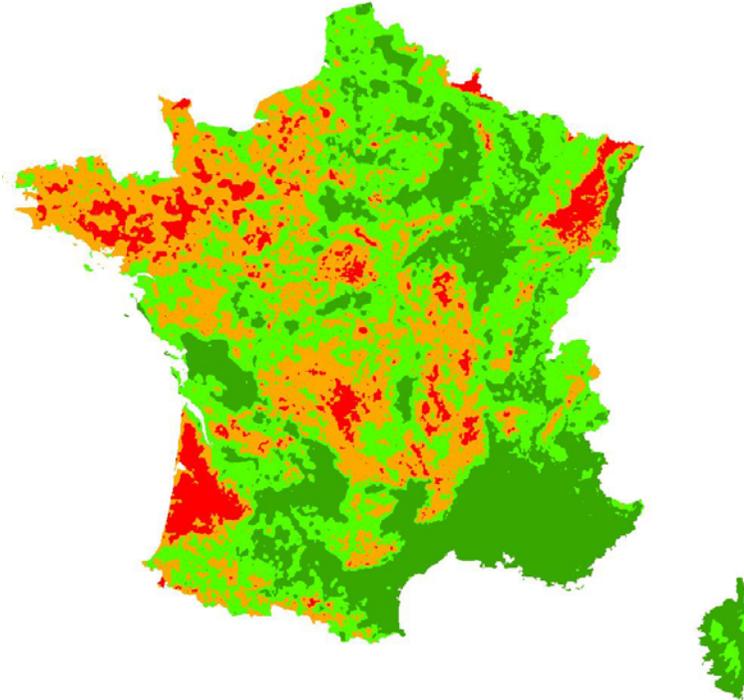
Cartes de sensibilité

Carte LERFoB - IFN

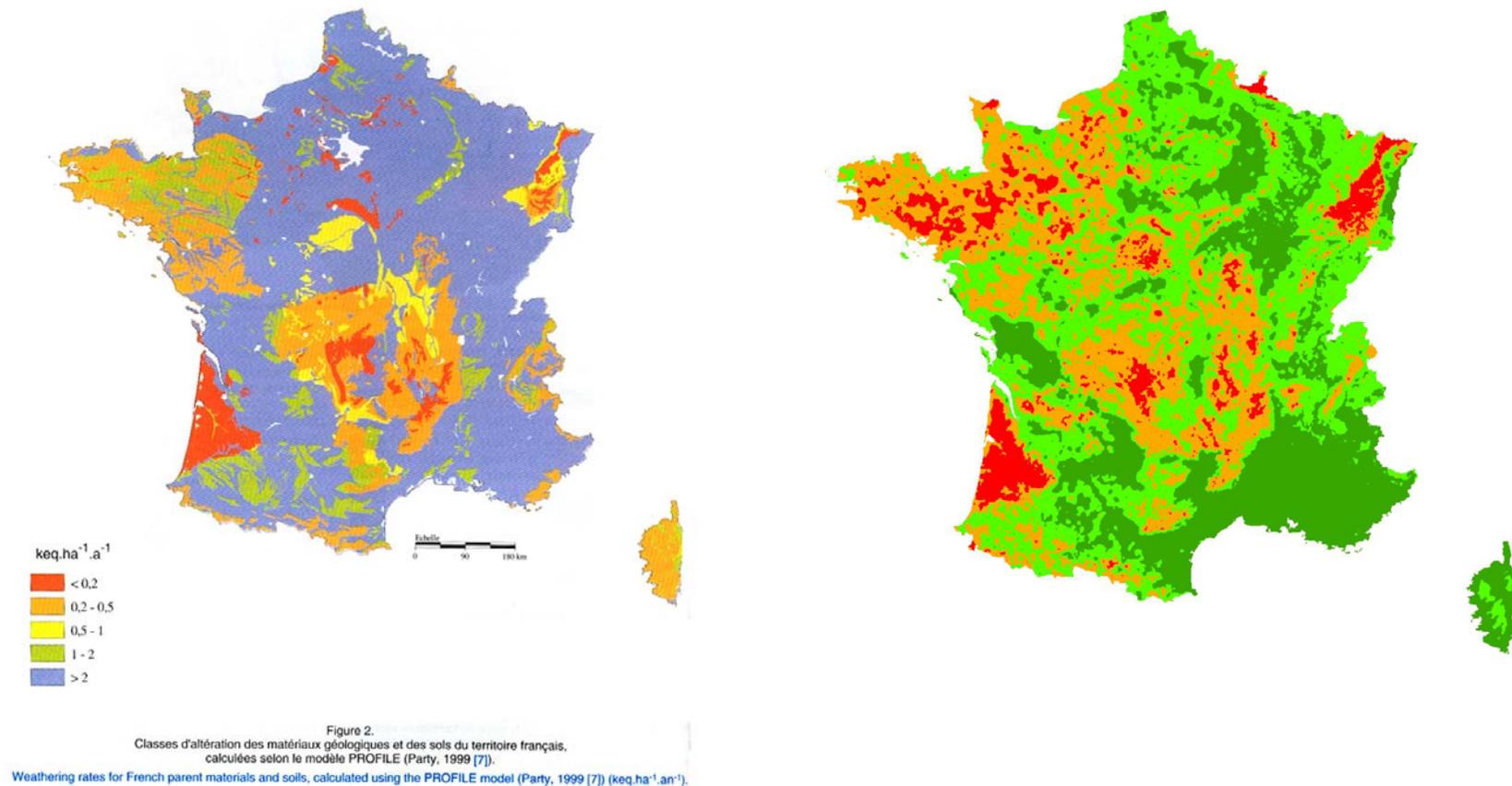
- pH bioindiqué par la flore sur + de 100 000 relevés IFN
- Pas = 1 km

Classes du guide ADEME

	$\text{pH} \leq 4.5$	
	$4.5 < \text{pH} < 5.5$	
}		$5.5 \leq \text{pH} < 6.5$
		$\text{pH} \geq 6.5$



A cette échelle on retrouve le fonds géochimique.....

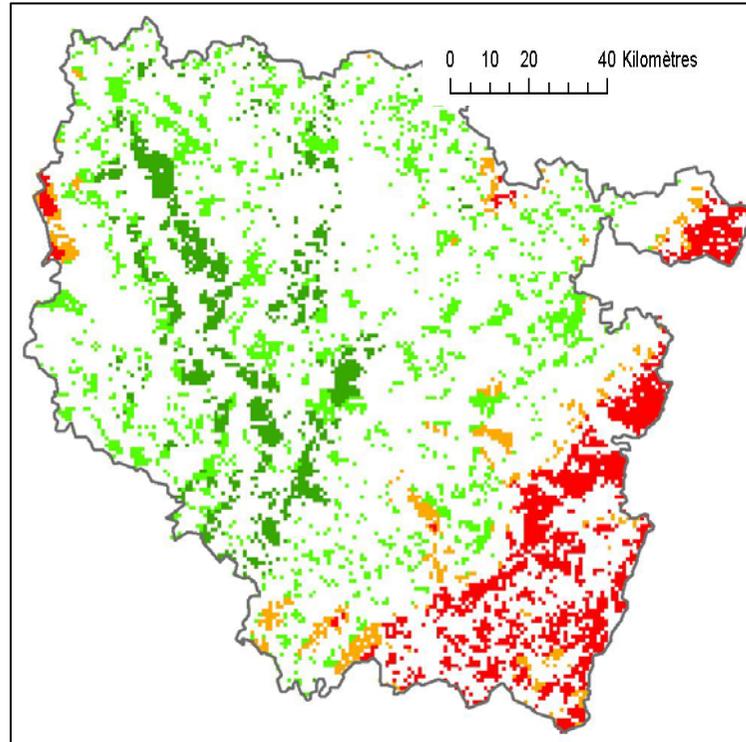


Cartes de sensibilité régionale

- pH X type de propriété

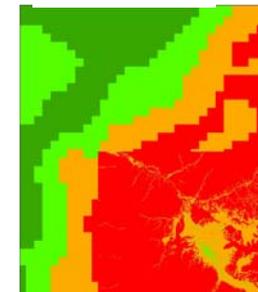
Surfaces en ha :

	Domaniales	Autres soumises
pH < 4.5	89 700	73 100
4.5 < pH < 5.5	25 000	36 000
pH > 5.5	67 900	164 800



Perspectives LERFoB :
Carte de pH des sols +
covariables, des Vosges au
pas de 50 m

0 1.25 2.5 5 Kilomètres



Echelle DT : ressource exploitable de rémanents

Local : consignes par massif + localisation de zones à affiner

Le maintien de la fertilité physique des sols

1- Tous les sols sont sensibles au tassement à l'état humide mais plus particulièrement les sols à texture fine, profonds, sans squelette : diminution de la porosité, augmentation de la résistance, développement de l'hypoxie/anoxie.....

2- La restauration naturelle de la porosité est très lente et la remédiation mécanique et/ou chimique en milieu acide non validée ; pb du cumul des contraintes et de leur réversibilité

3- La mécanisation de toutes les opérations sylvicoles est **inéluçtable** en France

➤ La dégradation de la qualité physique des sols forestiers (scalpage, orniérage, compaction) est un enjeu majeur qui risque de s'accroître avec l'augmentation des récoltes

➤ suivre au minimum les recommandations du **guide Prosol** (ONF - 2009) (cloisonnements voire systèmes alternatifs)



Diagnostic de sensibilité du sol au tassement (guide Prosol ONF 2009)

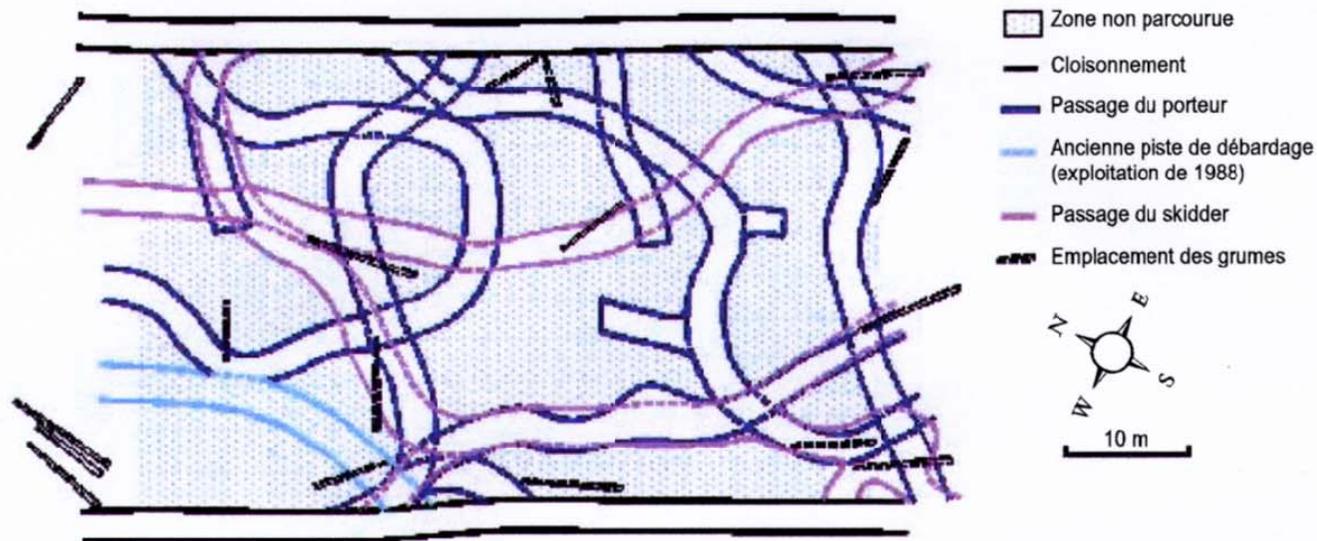
		État d'humidité (à l'instant t)			
		Sol sec Sur, au moins, 50 cm de profondeur	Sol frais	Sol humide	Nappe d'eau présente à moins de 50 cm de la surface
Propriétés permanentes du sol	Sol très caillouteux (EG > 50 %)				
	Sol très sableux (sables ≥ 70 %)				
	Argile dominante				
	Limon dominant et sable limoneux				

- Sol très portant - circulation d'engins possible mais toujours sur les cloisonnements
- Circulation sur cloisonnements possible avec précautions (pneus larges, tracks, rémanents)
- Aucun passage d'engins terrestres → Systèmes alternatifs (petite mécanisation, câble aérien)

Pressions exercées par les engins : surfaces parcourues

Exemple de carte du cheminement des engins de débardage

Cette carte a été établie après une éclaircie réalisée dans une futaie régulière de chêne. Le débardage des bois façonnés a été effectué par un porteur pour les courtes longueurs et un skidder pour les grumes. Sur cet exemple, la surface totale cheminée par les deux engins, en dehors des cloisonnements d'exploitation existants, représente 48 % de la parcelle.



Cacot, 2001

Organisation nécessaire pour rester sur les cloisonnements.....incompatible avec la récolte des souches et le plus souvent des rémanents

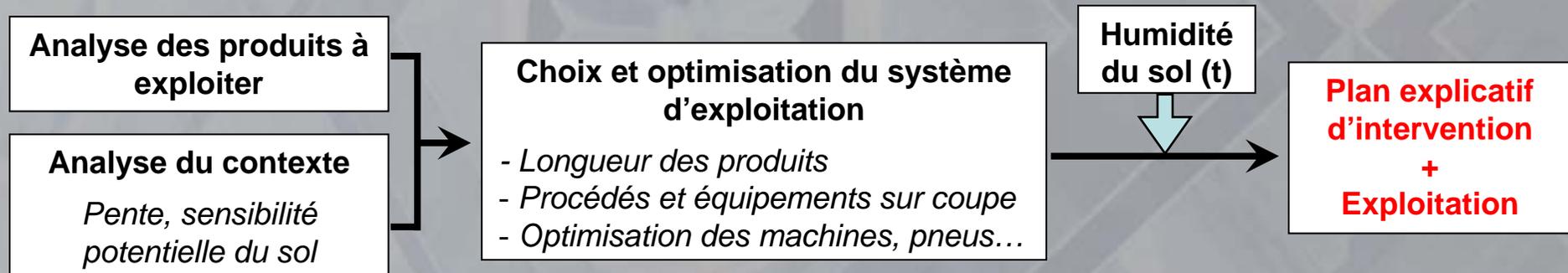
Comment éviter de tasser les sols (techniquement)

Diagnostic préalable de sensibilité :

- Propriétés permanentes du sol : texture, pierrosité, hydromorphie
- Humidité du sol = f(t) → Un sol bien sec est toujours portant

Précautions d'exploitation :

- Minimiser le nombre d'interventions



NECESSITE d'outils fiables de diagnostic

**Cas de figures pour mobiliser la ressource
en bois et implications pour le sol**

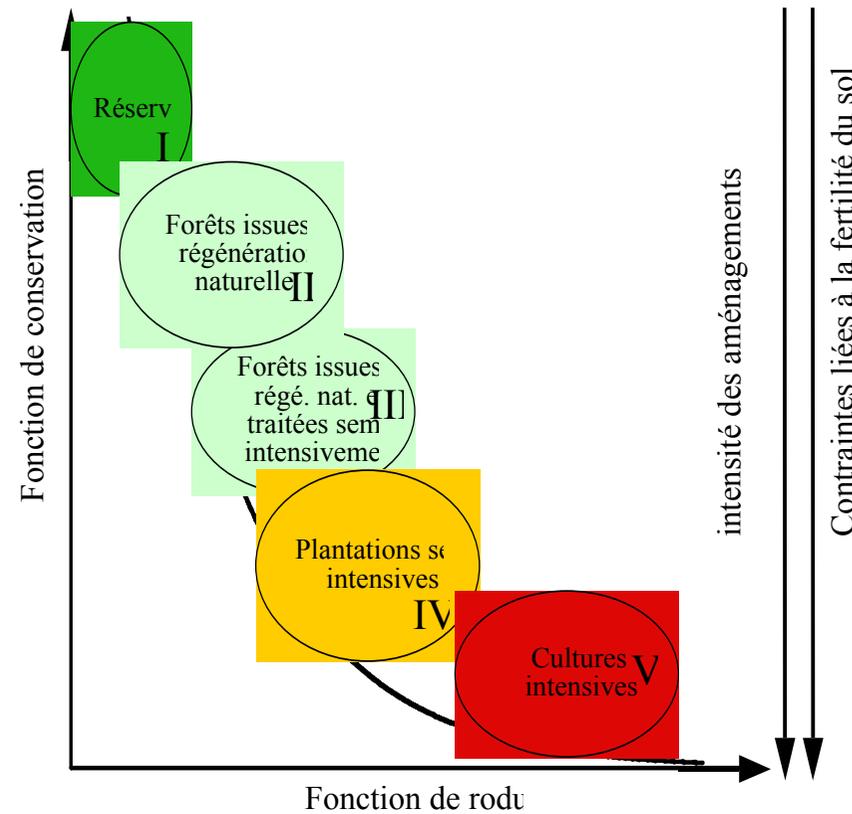
➤ Forêts gérées extensivement et exploitées de manière ‘minièrè’ (I et II)

➤ Régénérations naturelles ou plantations semi intensives (III et IV)

- exploitation classique bois fort vs arbre entier, éclaircies et peuplement principal : œuvre, industrie
- rémanents : industrie, énergie classique (bois de feu) ou nouvelle forme

➤ Cultures ligno-cellulosiques intensives (V)

- industrie, énergie



Contraintes liées au sol

I et II Demandégulée padisponibilité

III et IV Demande =? disponibilité indicateurs ; reméc

V Demande >> disponibilité fertilisation indispo

Forêts gérées extensivement dont la fonction majeure n'est pas nécessairement la production

En milieu tempéré, le premier problème n'est pas directement celui de la fertilité chimique des sols ; le problème d'érosion lors des coupes mal maîtrisées peut se poser

Cas des réserves, des forêts de protection. Pour ces dernières on ne récolte pas la possibilité, quand on le fait les rotations sont longues (>100 ans) ; récolte en mini- trouée ; débardage par câble voir hélicoptère etc...

En tropical : biodiversité, successions, mais aussi dégradation par érosion des sols très pauvres et très fragiles

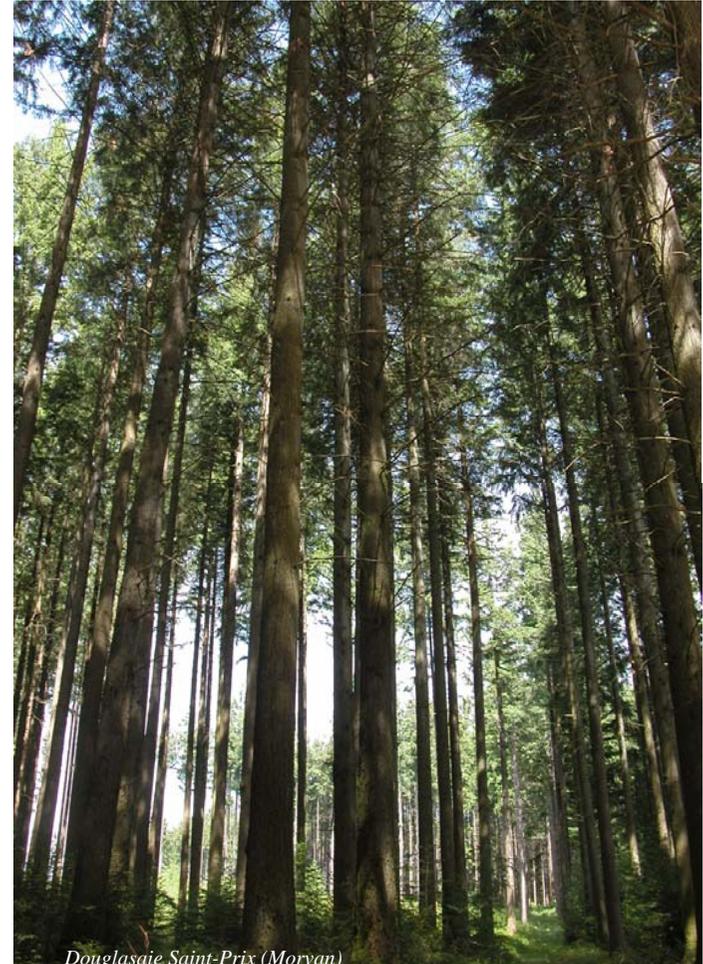
Forêts traitées de manière semi-intensive

Définition : on intensifie tout sauf les restitutions

Cas de la majorité des forêts françaises exploitées

Un gestion inappropriée peut conduire à l'appauvrissement des sols

➤ La durabilité de la fertilité des sols dépend du rapport entre le potentiel du milieu et les traitements et pratiques sylvicoles qui définissent la possibilité



Douglasaie Saint-Prix (Morvan)

Pratiques et bilans

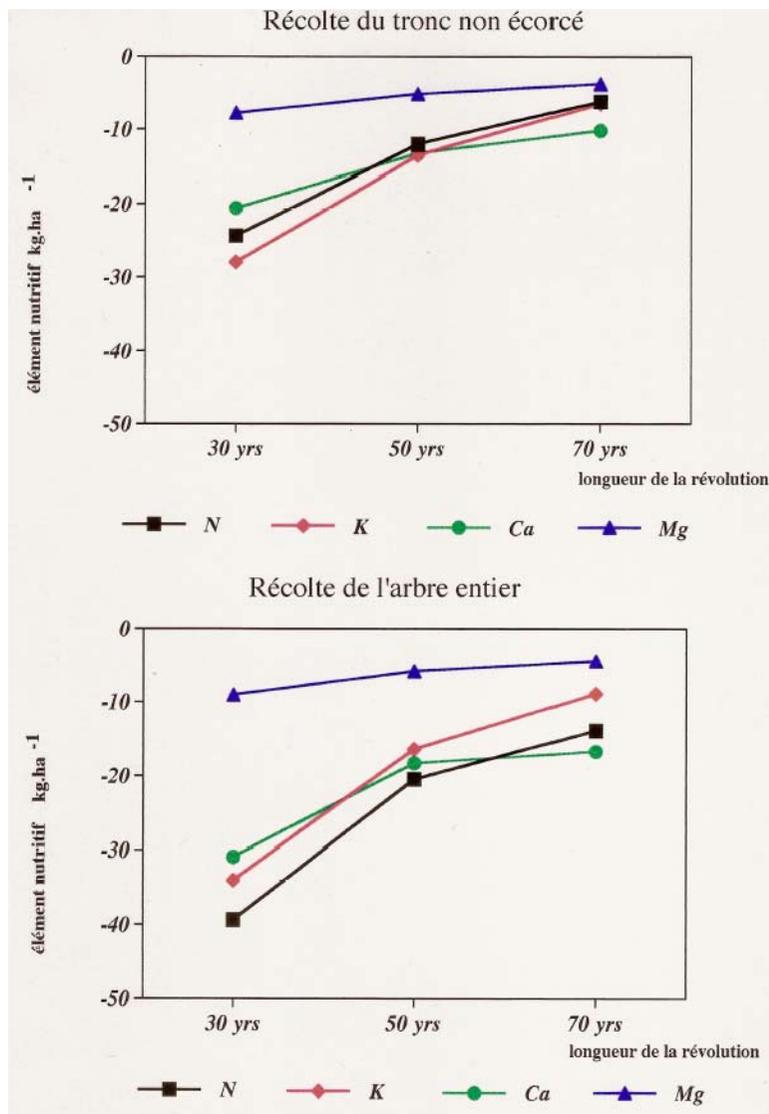
Exemple : bilan pour une révolution de Douglas dans le Beaujolais



- Plantation sur ancienne terre agricole
- Altitude 750 m
- Climat (moy. an. : pluie 1000 mm, temp. 7°C)
- Géologie: tuf volcanique viséen
- Sol : Alocrisols (sols bruns acide) humus de type moder (8% OM en A1), acide (pH<4.5) et désaturé (S/T<15%)
- Peuplements : chronoséquence de 26, 46 et 66 ans en 1998; production annuelle 21m³.ha⁻¹.an⁻¹ entre 20 et 40 ans, 17m³.ha⁻¹.an⁻¹ entre 40 et 60 ans; hauteur moyenne 14m à 20ans, 28 à 40 ans, 36 à 60 ans
- État sanitaire et nutritif satisfaisants

Simulation des bilans minéraux pour différentes longueurs de révolutions et différentes intensités de récolte

(Ranger et al, 2002)



- En absolu, quelle que soit la longueur de la révolution, le bilan est **toujours déficitaire**
- Le **déficit** est d'autant plus fort que **l'intensité de la récolte** est forte
- Le **déficit** est d'autant plus fort que la **révolution** est **courte**

Indices d'efficacité des essences

- **Pour produire** (NUE = MS en t pour 1 kg d'élément immobilisé)

	Douglas	Epicéa	Chênes	hêtre
N	0,6-0,9	0,5 - 0,8	0,3 - 0,5	0,5 - 0,7
P	8-13	4 - 13	4,8 - 9,0	5,3 - 7,3
K	0,9-3	0,8- 1,5	0,7 - 0,9	0,7 - 0,7
Ca	0,8-2	0,6 - 0,9	0,4 - 0,5	0,8 - 0,5
Mg	7-14	4 - 7	2,8 - 7,0	4,0 - 3,6

-**Pour utiliser les ressources** : ex recycler les litières, capter les DA, transférer..

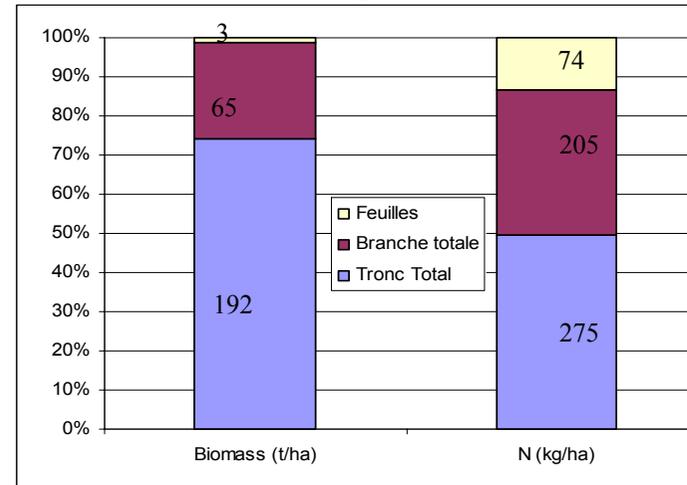
exemple des plantations comparatives de Breuil (Morvan)

	chêne	Douglas F	Douglas NF	épicéa F	épicéa NF	hêtre	pin Laricio	Sapin de Nordmann	Forêt native
MS	5573	4098	4045	4721	4406	3880	4844	2989	4882
C	2937	2186	2162	2455	2337	2073	2606	1638	2571
N	68,4	44,3	64,7	40,6	48,3	58,0	57,8	36,1	50,4
P	2,9	4	3	3	3	2,7	3,9	1,2	2,8
K	8,8	7,8	7,5	11,3	10,5	10,8	11,6	4,5	12,7
Ca	21,2	37,0	26,7	53,1	12,9	12,7	7,5	6,0	16,1
Mg	4,6	2,7	3,3	2,1	2,3	2,0	1,8	1,3	3,8

F = fertilisé à la plantation ; NF = nonfertilisé à la plantation ; MS = Matière sèche à 65°C

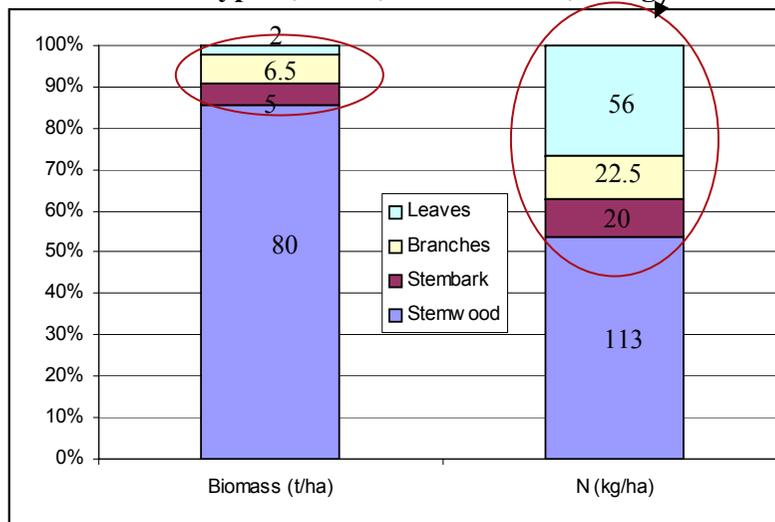
Gestion de la fertilité chimique des sols : effet du type de produit récolté

Hêtre, 80 ans, Fougères, France

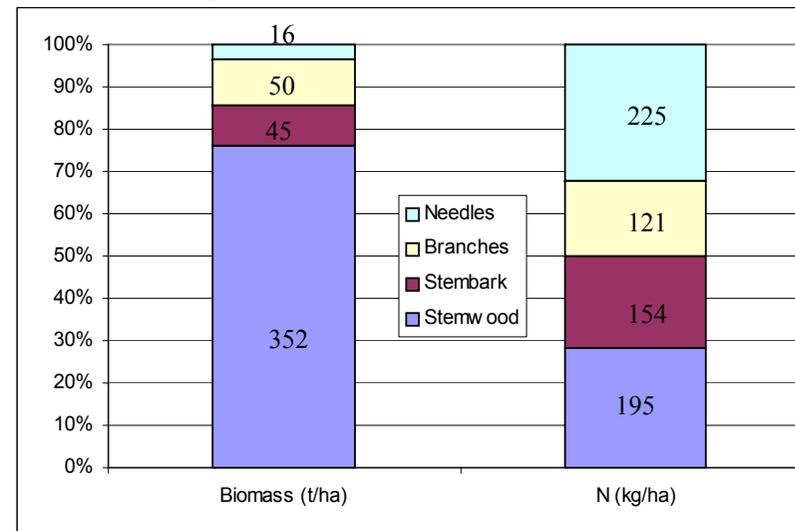


rémanents

Eucalyptus, 6 ans, Pointe-Noire, Congo

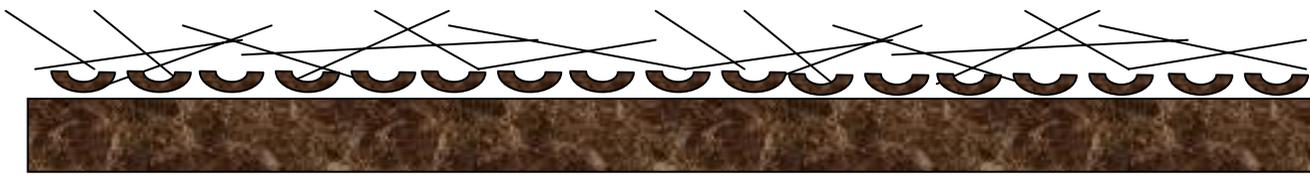


Douglas, 60 ans, Vauxrenard, France



From, Laclau, 2001; Nys 2007; Ranger 2004

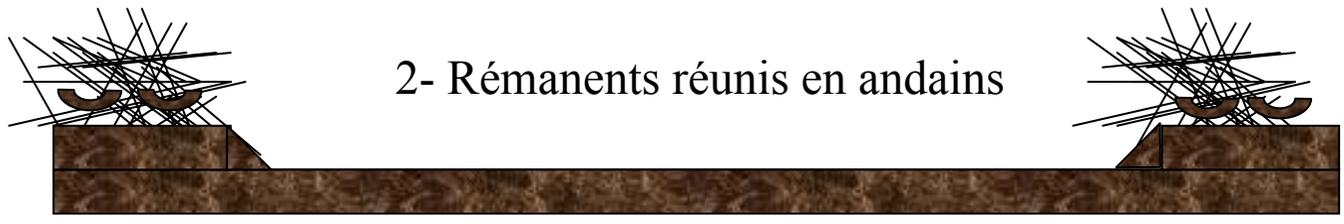
1- Rémanents répartis sur le sol



En stock initial.....

	N	P
Rémanents	342	29
Litière	620	43
Sol superficiel	220	10
<i>total</i>	1182	82

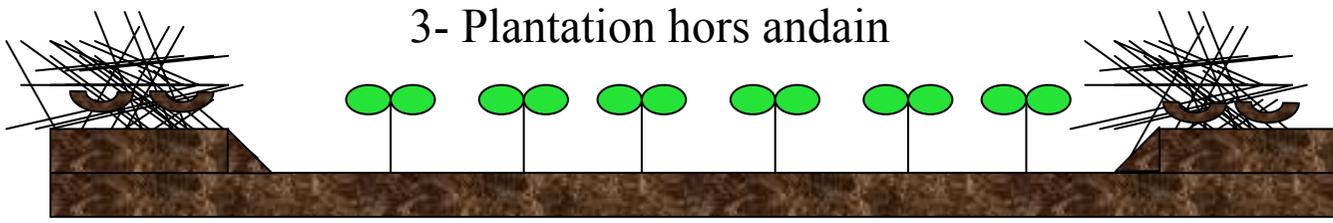
2- Rémanents réunis en andains



dans les andains.....

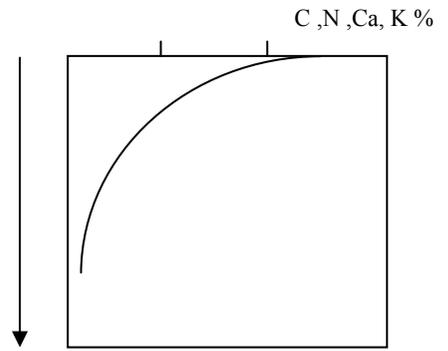
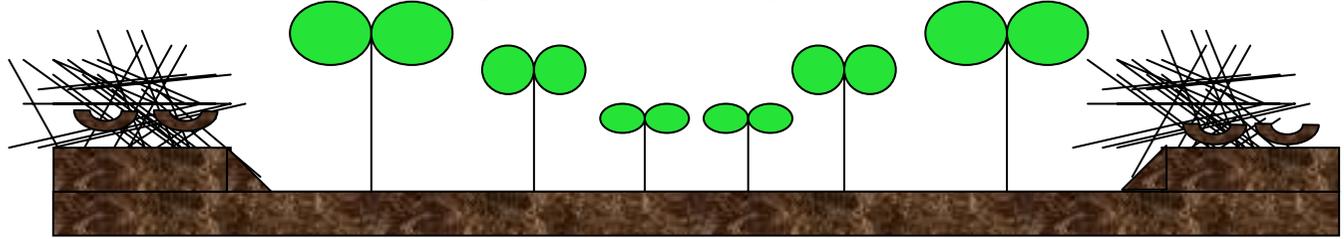
	N	P
Rémanents	342	29
Litière	620	43
Sol superficiel	88	4
<i>total</i>	1050	76

3- Plantation hors andain



Ex Douglas Beaujolais

4- Peuplement hétérogène en vague



Prof. Distribution des éléments dans le sol

*L'andainage une technique catastrophique si mal contrôlée.....
Récolte totale + scalpage des humus + évent. couloir d'érosion*

Cultures ligno-cellulosiques intensives : rotations moyennes

Cas du Pin maritime....singulier pour ce qui concerne la fertilité du sol.

Essence adaptée aux sols très pauvres (landes), mais fertilisation indispensable pour obtenir des productions correctes ($12-14\text{m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) avec des longueurs de révolution moyenne (entre 30 et 50 ans).

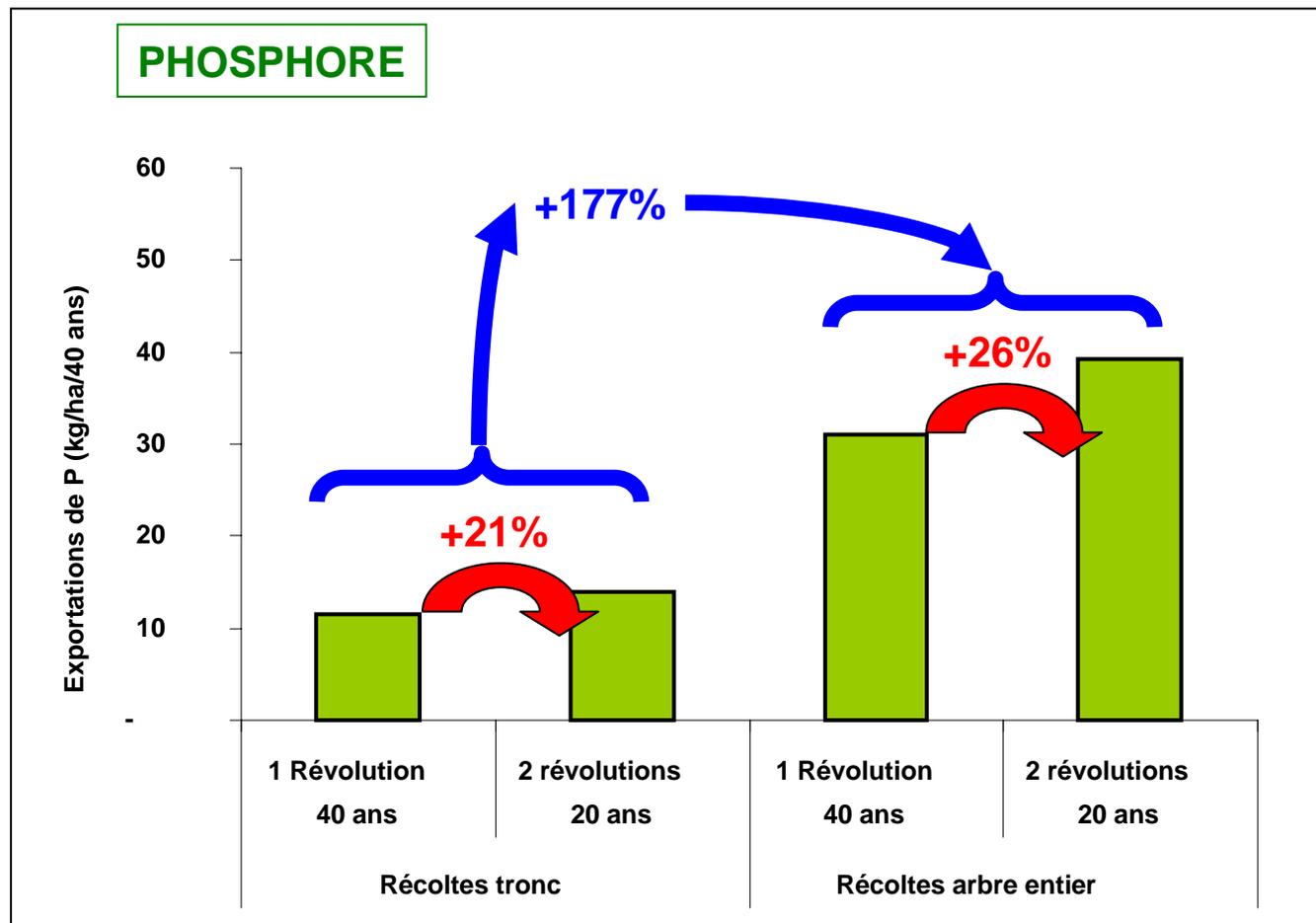
Ecosystème où le cycle BIOlogique domine, donnant un rôle majeur à la MO :

- risque avec les rotations plus courtes qui augmentent les cycles de travail intempestif du sol (dilution et minéralisation du C)

- risque avec les récoltes totales exportant C et nutriments....pouvant conduire à l'apparition de nouveaux facteurs limitants (P actuellement mais pourquoi pas N, K, Mg \pm oligoéléments)....changement de paradigme (apports fractionnés, nappe, changement d'essence etc..)

Ce système est plus à risque que les cultures semi intensives précédentes, en général et en particulier dans le cas présent (sol organique à très faible réserve de minéraux altérables).

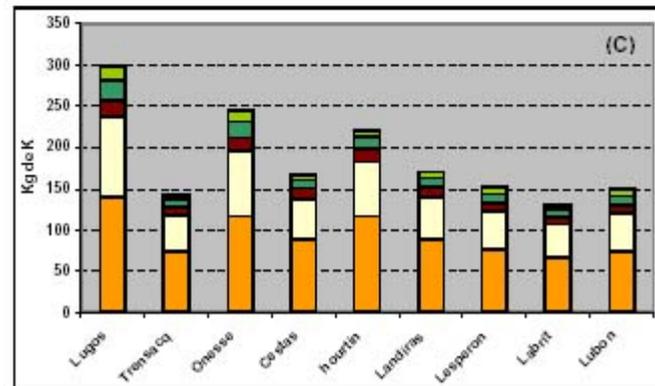
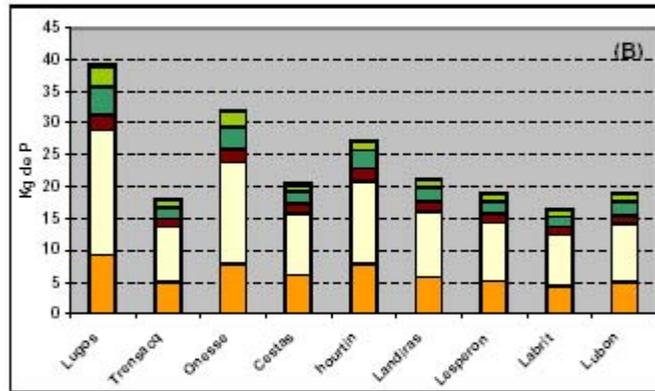
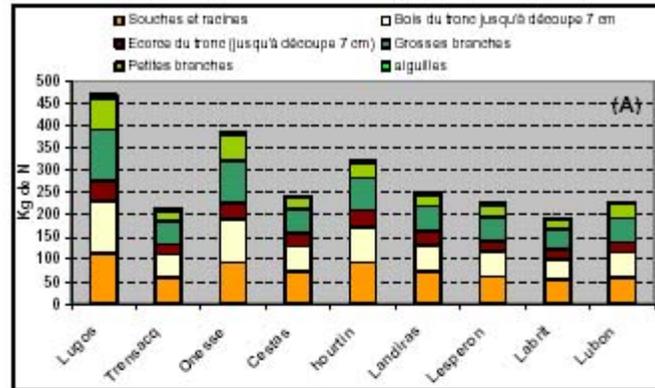
Pin maritime, classe de fertilité 1; simulation pour une récolte portant sur : tronc ou tronc + 30% des aiguilles, 60% des branches et 70% des souches (éclaircies & coupe rase)



profondeur	N tot	P tot	K tot	Ca tot	Mg tot	P ass	Kech	Ca ech	Mgech
			t.ha-1				kg.ha-1		
0-15 cm	1,5 - 2,0	0,11 - 0,29	4,8 - 7,1	0,8 - 1,6	0,27 - 0,44	27 - 34	28 - 39	193 - 289	49 - 72
15-45 cm	2,1 - 3,8	0,11 - 0,35	11,9 - 16,6	1,9 - 5,1	0,51 - 0,95	27 - 65	29 - 43	197 - 306	46 - 70
45- 100 cm	2,3 - 3,7	0,51 - 0,94	32,8 - 41,1	5,3 - 7,8	1,52 - 2,19	96 - 36	54 - 86	216 - 348	43 - 101
total	6,0 - 9,5	0,73 -1,58	49,5 - 65,1	8,0 - 14,5	2,3 - 3,59	150 - 236	111 - 168	606 - 944	138 - 244

Récolte et Exportation chez le Pin maritime

- N a un comportement classique
- P et surtout K voire Mg sont singuliers : forte teneur dans les troncs et surtout les souches pour K



Les scénarii où les rémanents, les souches et racines sont récoltés ne sont hélas pas irréalistes (cf nouveaux scénarii post tempête) :

- *Exportations accrues*
- *Perturbation intempestive de sols très organiques*



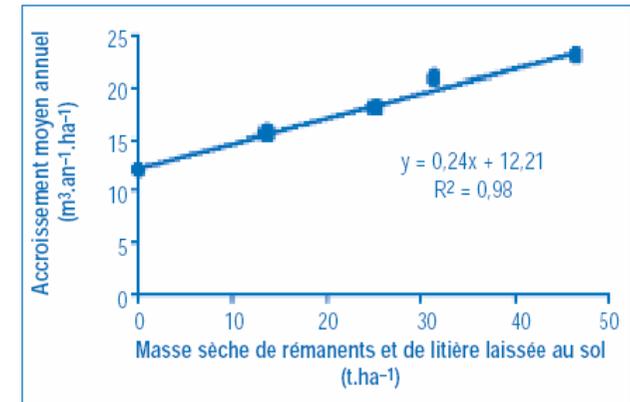
Cette machine
stigmatise la
négation de notre
capacité à
transférer les
connaissances sur
les sols et les
écosystèmes
forestiers...vers le
Développement

L'exemple tropical suivant (Bouillet et al., 2003) alerte sur la vulnérabilité des écosystèmes pauvres

Élimination des rémanents



Doublement des rémanents



à 72 mois.....+ 70 % de production

Hauteur = 19.4 m

Accrois. Cour. = **13.8** m³.ha⁻¹.an⁻¹

Hauteur = 22.5 m

Accrois. Cour. = **23.5** m³.ha⁻¹.an⁻¹

La fertilité en début de rotation est une fonction directe de la masse de rémanents au sol

Pose des questions génériques sur la fertilité à court, moyen et long terme et sur les méthodes pour identifier la biodisponibilité réelle dans des sols pauvres en Corg

Cultures ligno-cellulosiques : TCR

Cultures d'essences rejetant de souche et aptes à atteindre une production courante maximum très rapidement (2 à 3 ans) ; rotations <10 ans

Génotypes performants ----> forte interaction génotype - milieu

Cultures très exigeantes en eau et en nutriments pour obtenir des productions significatives (maxi observé 14t de MS ligneuse aérienne moyenne) nécessitant des sols fertiles (physique chimique et biologique). Incompatible avec les sols forestiers acides, hydromorphes, pentus, caillouteux etc...

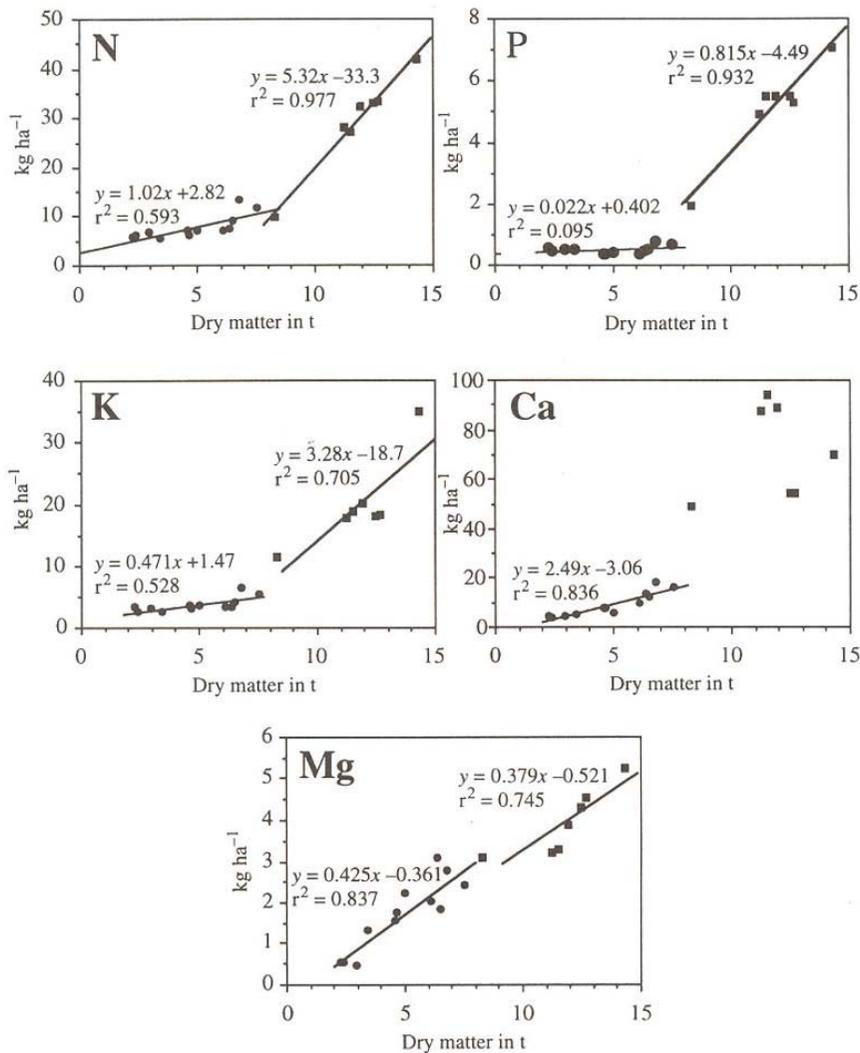
Concurrence très forte de la végétation spontanée

Sensibilité au tassement ?

Compétition pour les sols avec les cultures agricoles

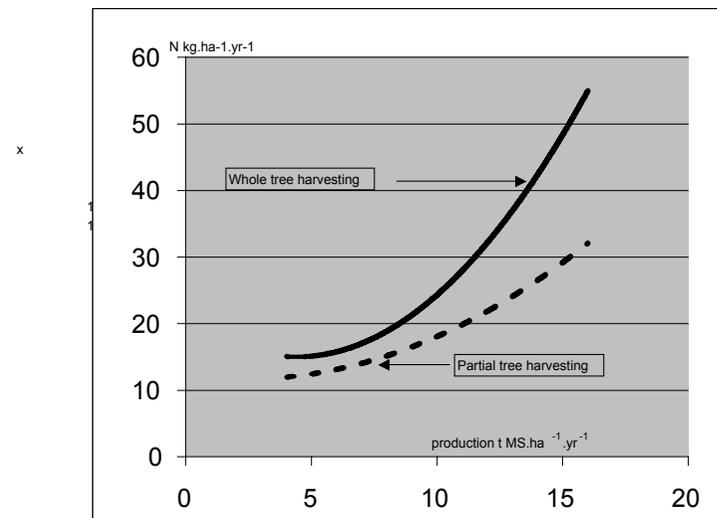
Fertilisation indispensable qui pourrait tolérer l'apport de déchets d'épuration riches en NPCa.....mais problème de protection des eaux de surface





Ranger et Nys, 1992

Total ligneux aérien



Extensive (no ferti, poor soil, no genetic improv.) ----> intensive (ferti., rich soils, genetic improv.)

Switzer et Nelson, 1972

Relation production de MS et immobilisation minérale en fonction de l'intensité de la sylviculture

TCR : quelques limites

Une production forte sur un sol forestier médiocre, même en fertilisant fortement ? **non**

TCR de Beaupré Uxeloup (58) (Gelhaye et al., 1997):

- Néoluvisol à pseudogley
- sol de fertilité minérale moyenne
- défriche de TSF puis andainage + labour disque (probablement tassement)
- bouture Beaupré (3300 recépées à 2 ans) ; rotation 9 ans
- entretien (manuel +rotovator) probablement insuffisant

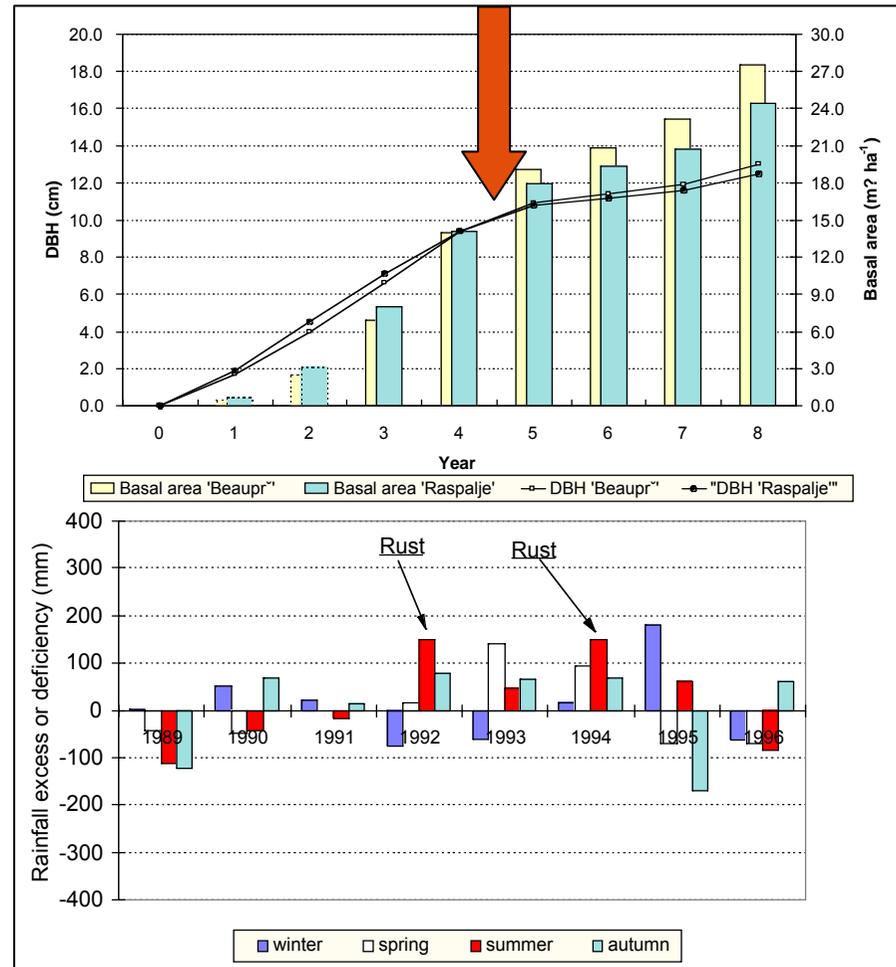
traitement	fertilisation	biomasse ligneuse aérienne totale (t.ha-1)	production moyenne annuelle (t.ha-1.an-1)
Témoin	0	9,8	1,1
P	125 (P)	13,9	1,5
NP2K1	328 (N); 215 (P) ; 190 (K)	22,1	2,5
NP1K1Ca	328 (N); 125 (P) ; 190 (K) ; 800 (Ca)	28,6	3,2

Contraintes à l'enracinement dues à la mauvaise qualité physique du sol ; déficit hydrique estival ; concurrence intra et inter ; probablement sensibilité du peuplier à l'anoxie

Une production soutenue sur sol de bonne qualité quelle que soit l'année climatique ? **non**

Essai AFOCEL de Conteville - 76
(Berthelot et al., 2000)

- sol sur dépôt alluvial récent
- sol riche
- plantation après labour sur prairie permanente
- deux clones (Beaupré et Raspalje)
- fertilisation N ($100\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) et P $65\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)
- production MS aérienne ligneuse moyenne annuelle (Beaupré 11,1t et Raspalje 9,3 t)



Cultures ligno-cellulosiques :TTCR

Plantations très exigeantes qui nécessitent des sols très fertiles et très bien alimentés en eau, en particulier pendant la période estivale.

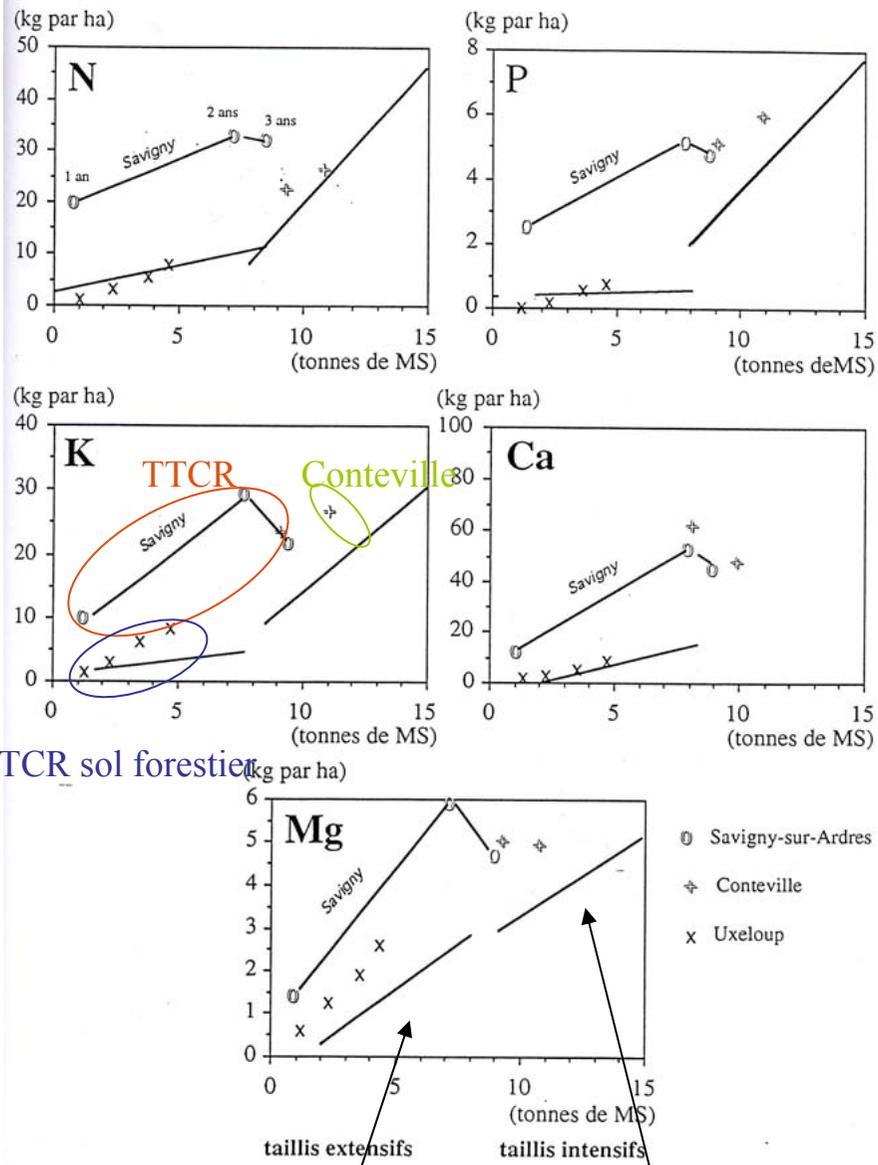
Ces plantations à cycles très courts se comportent pratiquement comme des cultures annuelles, et sont soumises aux mêmes lois agronomiques

Les bilans de fertilité sont fatalement toujours très négatifs et la fertilisation obligatoire



	taillis Châtaignier (20-30 ans)	Autres taillis (30-40 ans)	Peupliers TCR 7-9 ans	Ecucalyptus 7- 9ans	Eucalyptus 1 an	TTCR 1 an	TTCR 2 ans	TTCR 3 ans
N	0,6 - 0,9	0,3-0,4	0,3 - 0,4	0,4 - 0,5	0,3	0,1	0,2	0,3
P	6,6 - 15,5	3,9-5,2	2,0 - 4,3	2,1 - 2,4	1,2	0,4	1,5	1,6
K	1,3 - 1,8	0,7 - 1,0	0,4 - 0,7	1,7 - 1,8	0,3	0,1	0,3	0,4
Ca	0,5 - 0,8	0,5-0,6	0,1 - 0,2	1,2 - 1,5	0,4	1	0,2	0,2
Mg	2,3 - 3,0	4,2-6,1	2,7 - 3,5	2,2 - 2,5	0,5	0,2	0,9	1,9

Efficiene de quelques peuplements dans l'utilisation des éléments nutritifs pour produire la biomasse (t de MS produite par kg d'élément consommé)



TCR sol forestier

TTCR : exemple de Savigny-sur-Ardres (02) (André Gavaland INRA Orléans, 1998)

-1 an : faible production, rapport houppier/tige défavorable, tissus jeunes concentrés, transferts internes nuls, faible efficacité minérale

-2 ans : la production courante est forte (7,6t) , le rapport houppier/tige est moins défavorable, les transferts se mettent en place

-3 ans : la forte concurrence (12500 boutures initiales) limite la production (8,7t) ; la consommation diminue et tend vers le TCR.

Révolutions : éléments de comparaison pour la demande au sol

				N	P	K	Ca	Mg	
révolutions longues	Immobilisation	moyenne	toutes essences	5-15	0.5-2	2-10	5-15	0.5-3	
courtes rotations (> 10tMS)	Immobilisation	moyenne	Feuillus	30-50	6-8	20-35	55-90	3-8	
révolutions longues	Prélèvement		Résineux	30-50	3-5	15-35			Cole & Rapp 1981 Cole & Rapp 1981
			Feuillus	40-80	4-6	35-55			
courtes rotations (> 10tMS)	Prélèvement	moyen courant	Feuillus	70-110	10-20	70-110			
			Feuillus	100-150	20-35	110-160			

La disponibilité des éléments dans le sol pour satisfaire cette demande dépend de plusieurs facteurs :

- La mobilité des éléments (en instantané, le stock biodisponible doit être 50 fois > au prélèvement pour P et 20 fois pour les autres éléments plus mobiles)
- Le volume de sol colonisé (améliore la ressource nutritive et tamponne les variations hydriques)
- la prospection racinaire et les associations biologiques
- Le régime hydrique

Conclusions

- la récolte de biomasse est toujours possible à condition de juger de son impact sur la durabilité des sols et sur la qualité de l'environnement
- les rémanents ont un rôle majeur dans le système. Leur utilisation à des fins énergétiques doit être parfaitement raisonnée en fonction des milieux (cf guide Ademe). La restauration du sol est difficile, partielle et rarement durable.
- les rotations courtes, conduisent à l'utilisation d'essences performantes, améliorées génétiquement, qui sont exigeantes quant à la qualité des sols dans tous ses aspects : chimique, physique et biologique.
- certaines essences classiques, traitées en taillis à moyenne rotation (entre 15 et 25 ans), devraient produire sans ou avec peu d'intrants des quantités de biomasse intéressantes (châtaignier, robinier, tremble) sur des sols non concurrents avec l'alimentaire, contrairement aux TCR et TTCR.

Protection des Eaux

Risques de dégradation, possibilité d'amélioration



Facteurs contrôlant la qualité des eaux de surface

- Géologie
- Age des altérites (ANC)
- Sols et répartition dans le BV
- Climat (pluviométrie/ETP)
- Hydrologie (temps de résidence de l'eau et voies de transfert)
- Couverture végétale et son traitement (essences, LAI, caractère sempervirent, coupes)
- Structure des BV
- Climat de pollution

Les zones forestières se distinguent des zones agricoles par :

Moins d'intrants, donc moins de produits exportés

Une gestion plus proche de la nature

Des sols moins denses, plus riches en matière organique et plus acides.

Les eaux « forestières » se distinguent des eaux « agricoles » par:

Des eaux propres, non polluées..... bonnes pour diluer

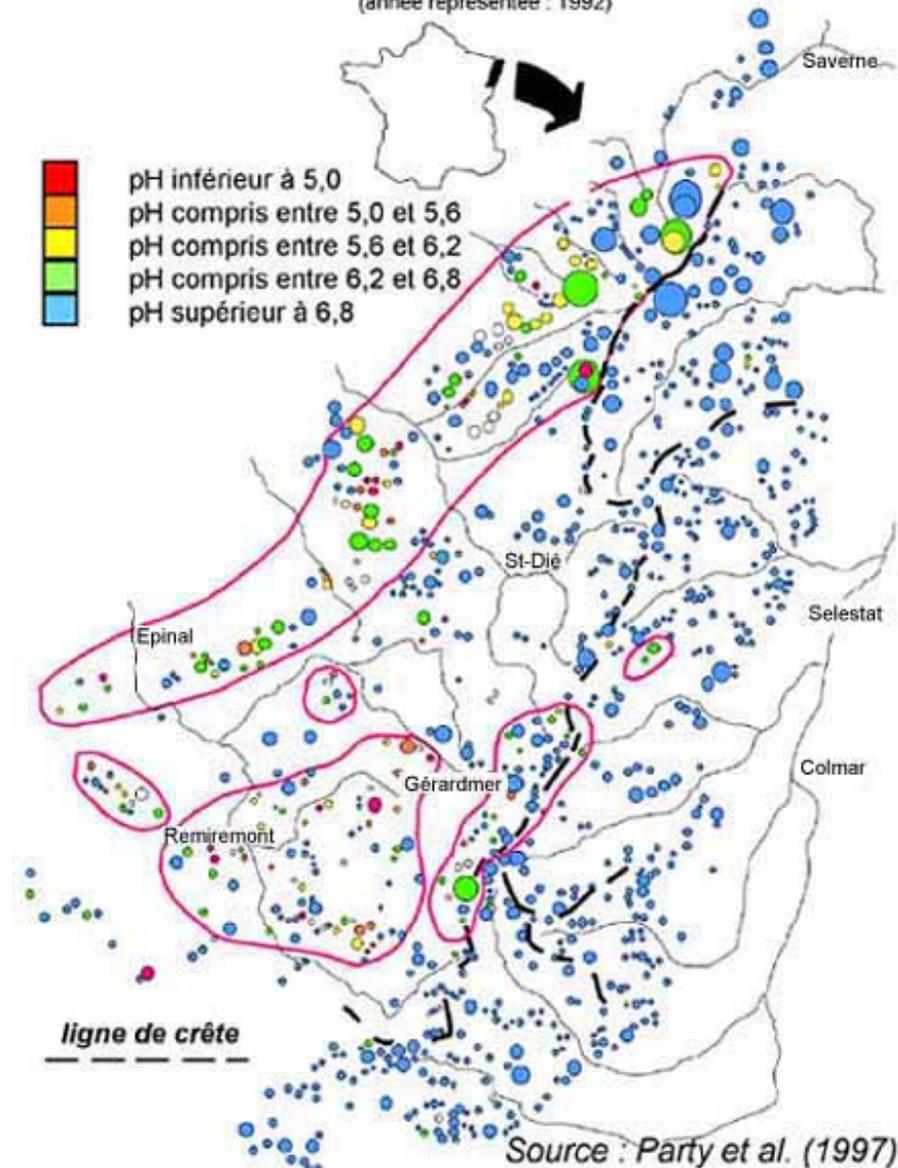
Des eaux parfois “ trop ” propres et ou MAIS... Acides !!

Des capacités épuratoires élevées

Des eaux parfois “ trop ” propres MAIS... Acides !!

L'acidification touche les ruisseaux du massif vosgien

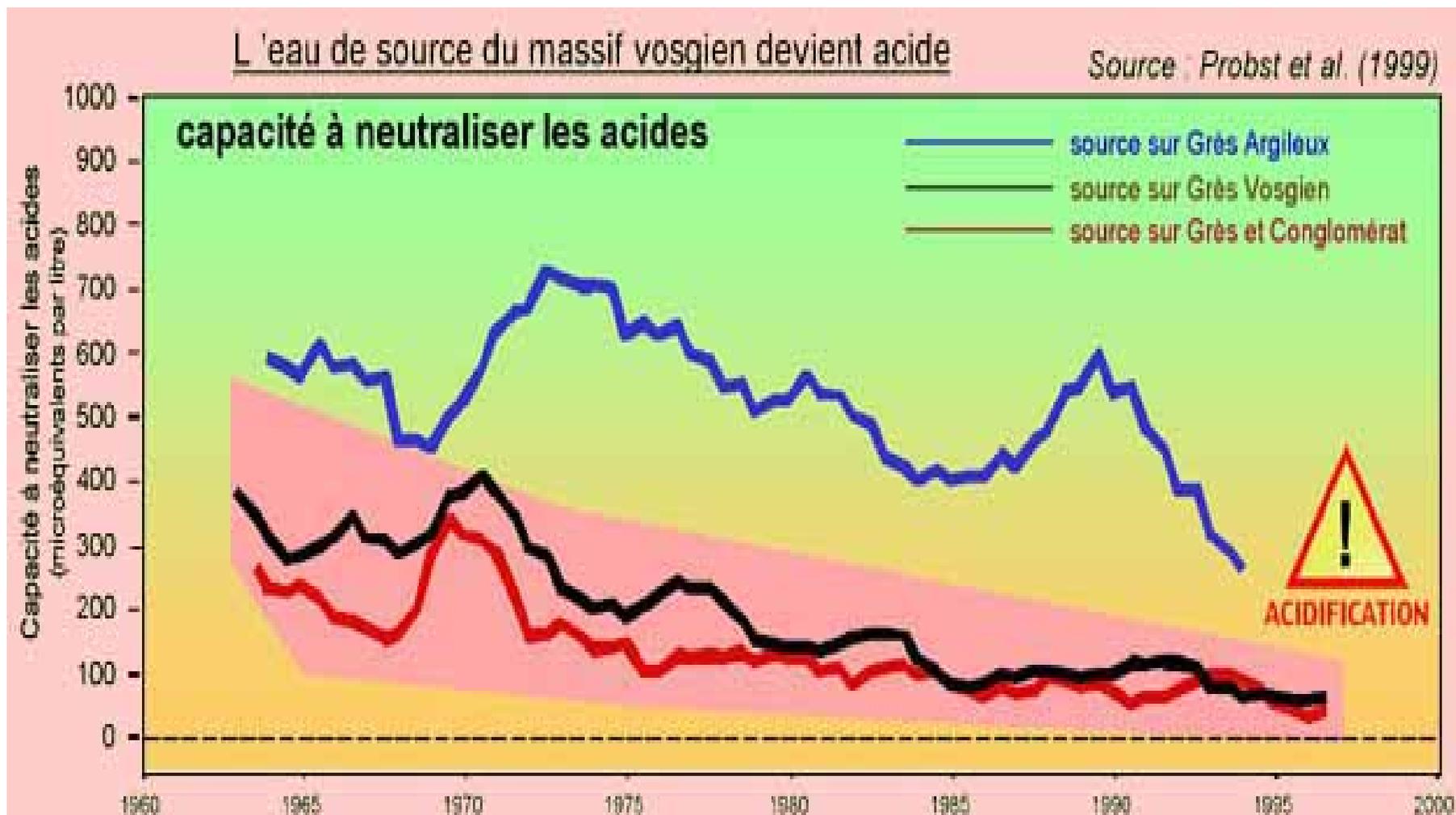
(année représentée : 1992)



En 1995, 10% des ruisseaux du massif Vosgien sont acides ..très lié à la géologie

Des eaux parfois “ trop ” propres mais... Acides !!

Les eaux de source n'ont pas toujours été acides !! Acidification f de la qualité du substrat...



Des eaux parfois “ trop ” propres et... Acides !!

*Les remèdes: Quelques recommandations
simples aux gestionnaires*

Savoir attendre (le pire n'est pas toujours le plus probable)

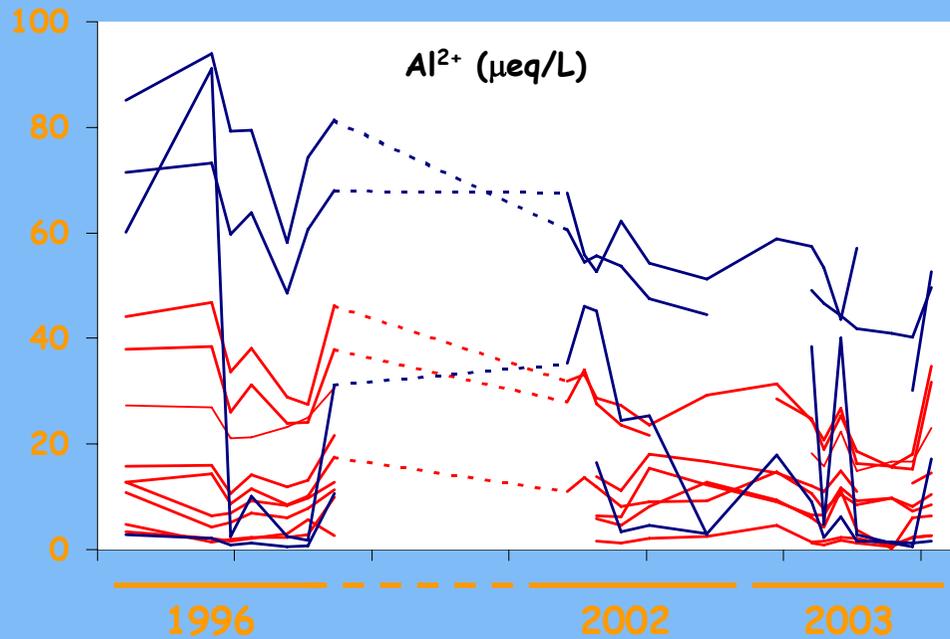
Mélanger

Corriger avec discernement

Récolter à maturité

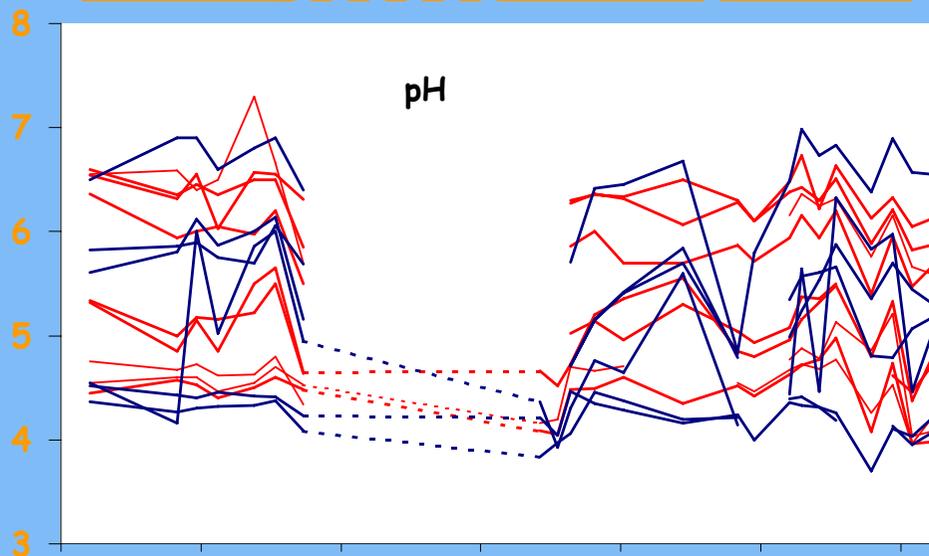
Diriger les tempêtes

Evolution de l'acidité dans les Vosges



Baisse importante de l'aluminium pour une majorité de ruisseaux

Origines diverses pour cette restauration...

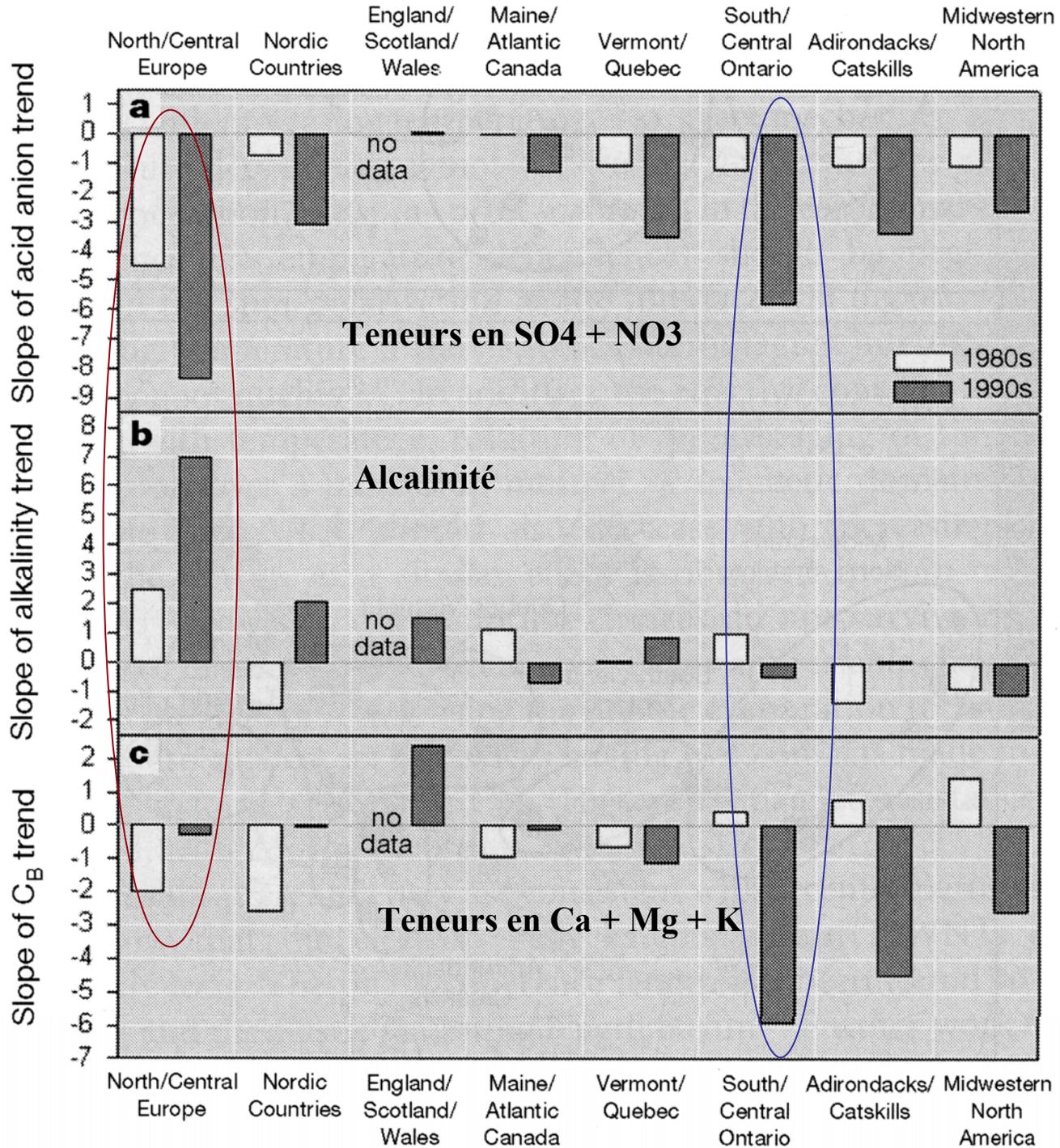


Stabilité du pH sur les 8 dernières années, fortes amplitudes saisonnières

*Evolution
1970-2000
de l'acidité
des ruisseaux*

Stoddart et al.
Nature 1999

Pas
toujours
les
mêmes
réactions



Des eaux parfois “ trop ” propres mais... Acides !!

Quelques recommandations simples aux gestionnaires

Savoir attendre (le pire n'est pas toujours le plus probable)

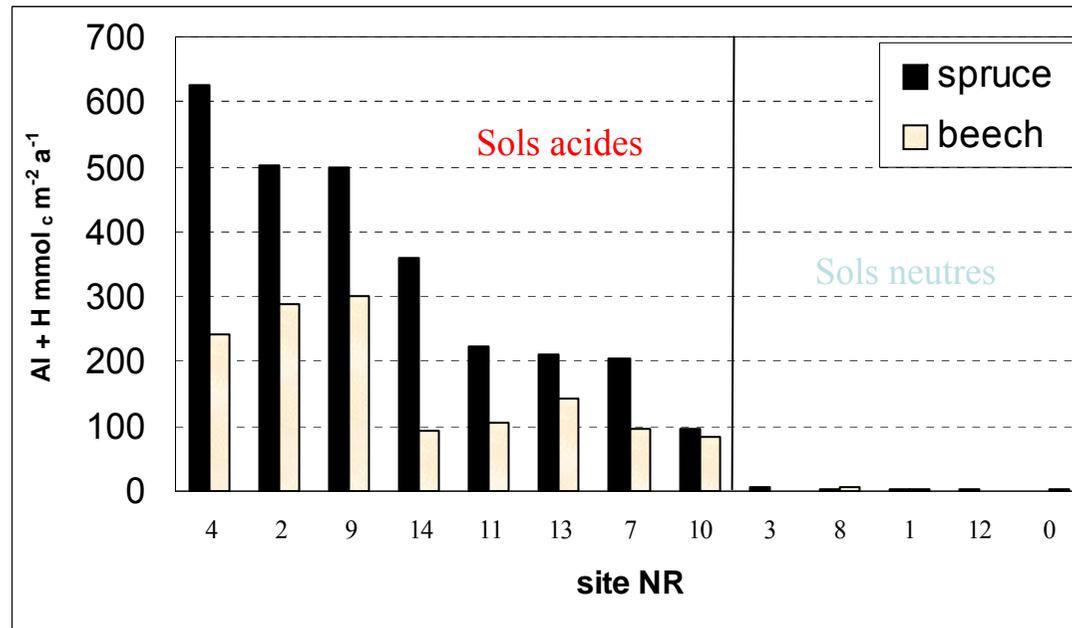
Mélanger, éviter les fortes densités

Corriger avec discernement

Récolter à maturité

Diriger les tempêtes

Drainage d'acidité (Al + H) plus faibles sous le sol de peuplements de Hêtre Par rapport aux peuplements d'Épicéa



Le mélange devrait améliorer les choses

Des eaux parfois “ trop ” propres mais... Acides !!

Quelques recommandations simples aux gestionnaires

Savoir attendre (le pire n'est pas toujours le plus probable)

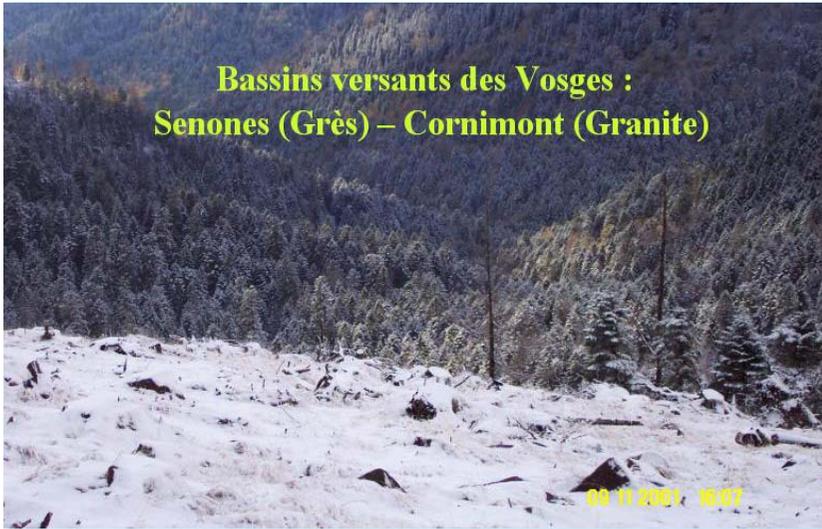
Mélanger

Corriger avec discernement

Récolter à maturité

Diriger les tempêtes

**Bassins versants des Vosges :
Senones (Grès) – Cornimont (Granite)**



PROJET CHAULAGE

Localisation : Val de Senones

Roche Mère : Grès Vosgien

Sol : Podzosol

Matériaux utilisés : CaCO_3 , MgCO_3 ,
 CaSO_4 , KCl

Quantité : 2,5 t/ha

Méthode : épandage
par hélicoptère

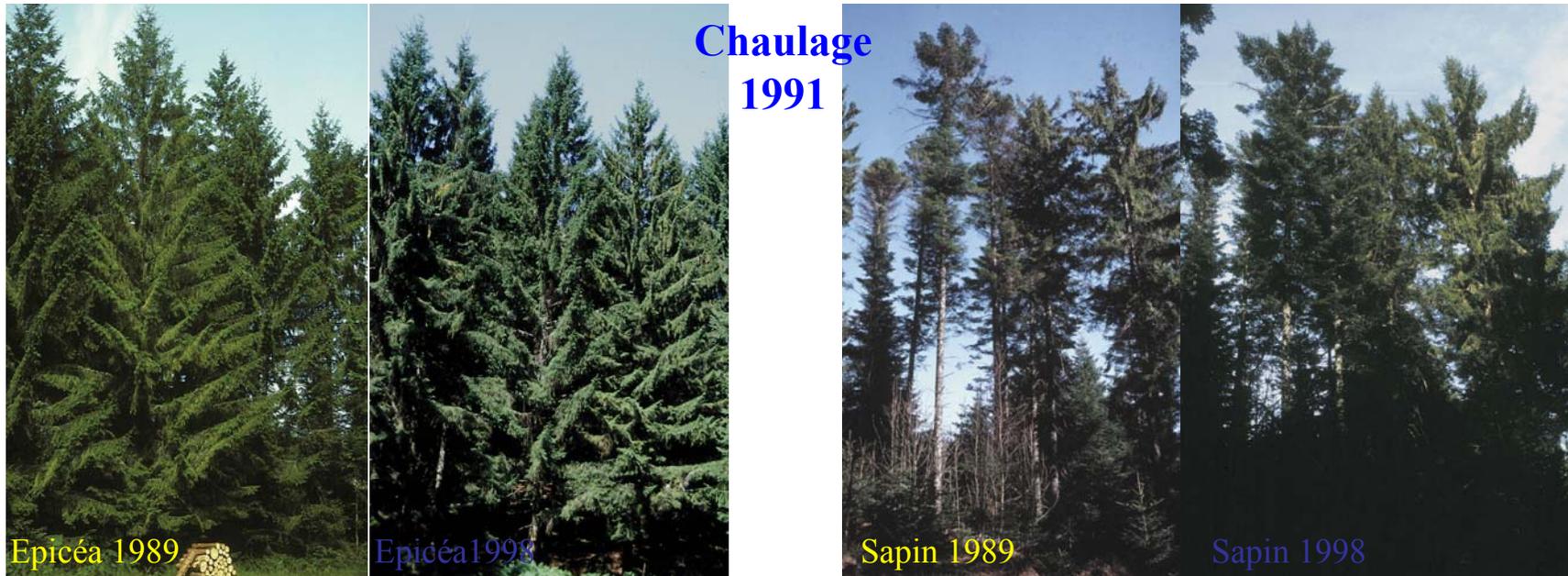
Coût: 500 €/ha

Subvention Etat 50%



Les effets du chaulage sur l'acidité des humus et la nutrition des peuplements

sont **rapides et spectaculaires**

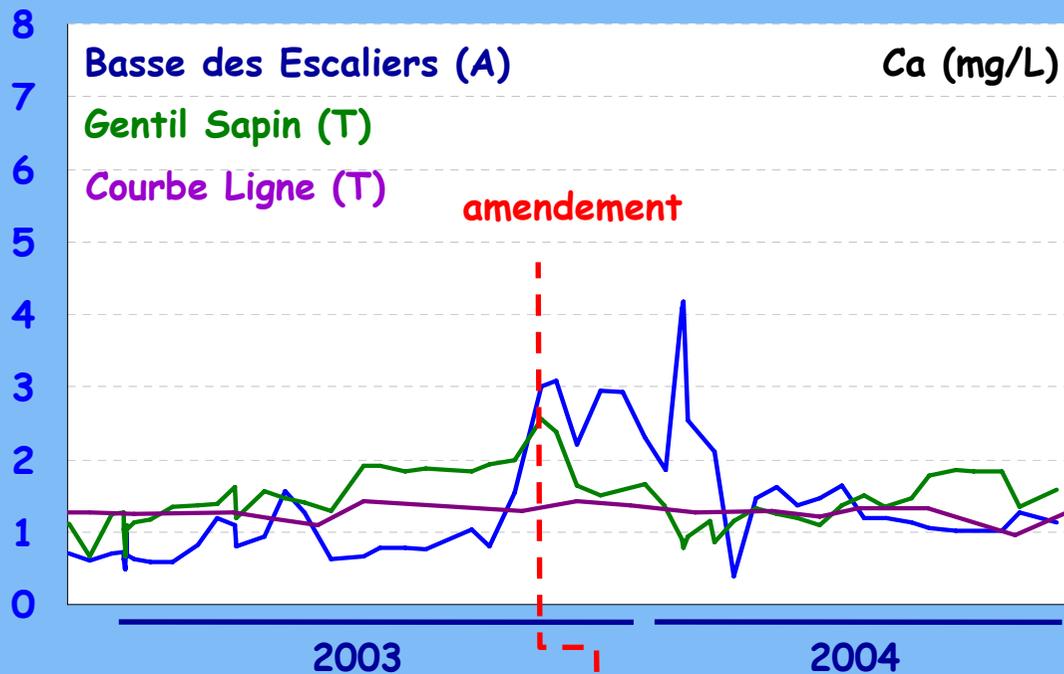


Foret communale de Vagney

Les effets du chaulage des bassins versants sur l'acidité des ruisseaux sont

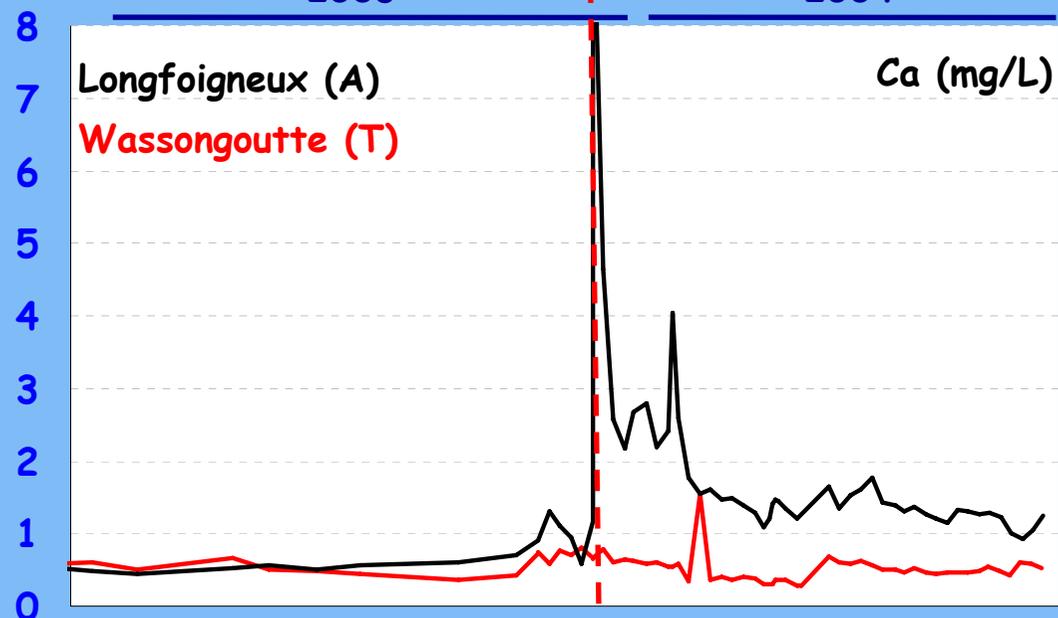
généralement **lents et progressifs**

Résultats : Suivi chimique (Angeli et al., 2008)



Sur grès, retour rapide aux concentrations d'origine

Importance du temps de résidence de l'eau dans le sol



Sur certains granites, pic de calcium plus intense, se prolongeant pendant des années

Des eaux parfois “ trop ” propres mais... Acides !!

Quelques recommandations simples aux gestionnaires

Savoir attendre (le pire n'est pas toujours le plus probable)

Mélanger

Corriger avec discernement

Laisser vieillir en fûts, récolter à maturité

(Voir plus haut)

Diriger les tempêtes, se méfier du barbier

Quelques recommandations simples aux gestionnaires

Savoir attendre (le pire n'est pas toujours le plus probable)

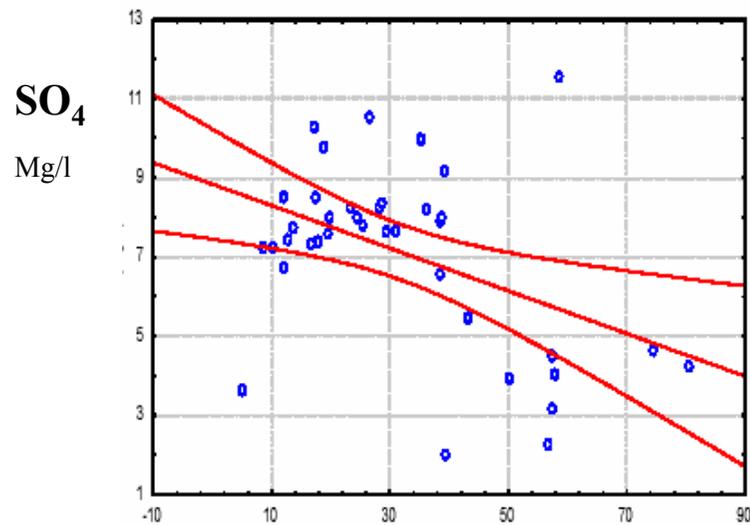
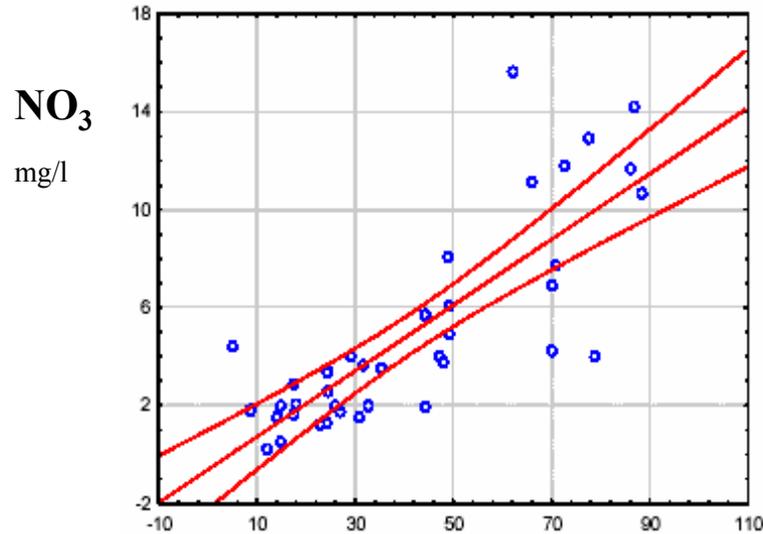
Mélanger

Corriger avec discernement

Laisser vieillir en fûts, récolter à maturité

Diriger les tempêtes, se méfier du barbier

Variation des concentrations en nitrate et sulfate de ruisseaux forestiers en fonction du pourcentage de dégâts forestier après tempête (Genay 2002)



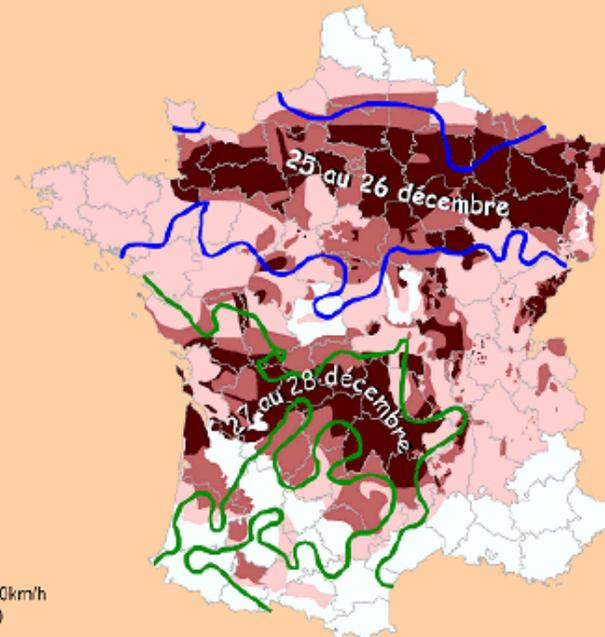
Pourcentage de dégâts forestier %



Estimation des dégâts après les tempêtes de décembre 1999

Carte réalisée par l'Inventaire Forestier National (IFN), pour le compte de la Direction de l'Espace Rural et de la Forêt (DERF), présentant les zonages de dégâts forestiers fournis par les Services Régionaux de la Forêt et du Bois (SRFB) pour les départements concernés.

- pas de dégâts
- dégâts diffus
- dégâts sévères
- dégâts massifs
- limites des vents de 120km/h (source : météo-france)
-



pas de dégâts : dégâts inexistant ou non significatifs
dégâts diffus : essentiellement destruction dispersée d'arbres isolés ou de petits groupes d'arbres (moins de 5 ares)
dégâts sévères : présence significative de surfaces détruites de plus de 5 ares, mais rareté de destructions de plus de 4 ha d'un seul tenant
dégâts massifs : présence significative de surfaces détruites de plus de 4 ha

Des eaux parfois “ trop ” propres MAIS ???... Acides !!

<http://www.nancy.inra.fr/acidification/index.html>

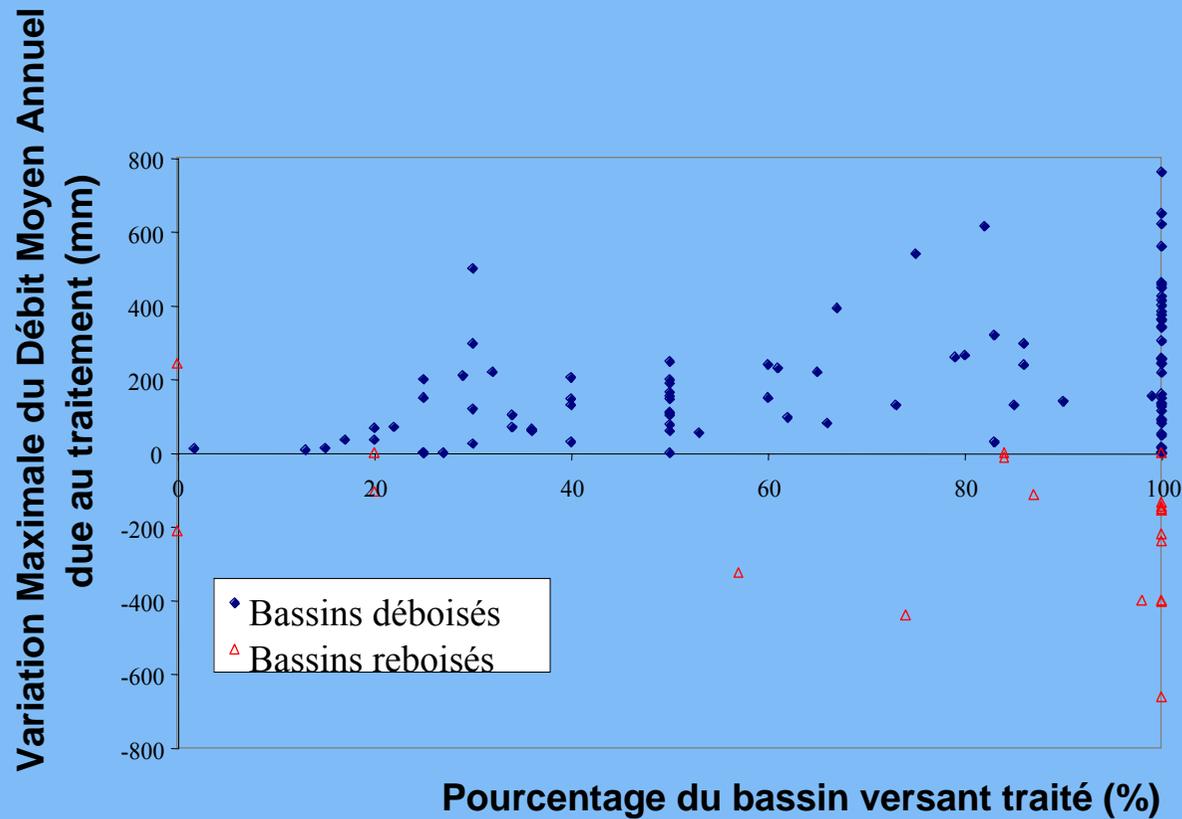
Des capacités épuratoires élevées

Zones humides forestières, rôle auto-épurateur

Depuis un siècle et demi, la superficie forestière a plus que doublé en métropole : quels en sont les effets sur le régime des eaux ? Très globalement, en se méfiant des effets d'échelle, on retiendra que ce développement conduit aux tendances suivantes :

- sur les crues, ceci va dans le sens de la sécurité (réduction des crues moyennes, contrôle de l'érosion), mais l'impact est marginal pour les crues extrêmes ;
- une forte réduction des transports solides
- une diminution de l'écoulement annuel issu des bassins versants ;
- une réduction des débits d'étiage.

Effets de la sylviculture sur l'hydrologie



Le déboisement a pour effet d'augmenter le débit moyen annuel, et le reboisement a pour effet de le diminuer. Cependant les résultats sont extrêmement dispersés, ce qui rend difficile la prévision de l'impact hydrologique d'une coupe.

A photograph of a riverbank with large trees and exposed roots. The water is dark and reflects the surrounding greenery. The trees have thick, textured bark and their roots are exposed and spread out along the bank. The scene is set in a forested area with dense foliage in the background.

Des capacités épuratoires élevées

**Les berges forestières
sont plus stables
Le boisement réduit la
charge particulaire**

Des capacités épuratoires élevées

Forêt signifie réduction de l'entretien des cours d'eau:

Augmentation des méandres et du chevelu

Augmentation des zones humides

Augmentation des embâcles, bois dérivants, barrages,
(liés au boisement des berges et développement des colonies de castor)

Réduction de l'insolation et de la température

Réduction de la vitesse et de l'épaisseur de la lame d'eau:

Meilleur potentiel d'auto épuration

Synthèse qualitative de l'impact des différents types d'espaces forestiers sur les caractéristiques de la ressource en eau et des milieux aquatiques

	Disponibilité de la ressource en eaux	Soutien des étiages	Limitation des crues	Protection des sols	Réduction de la turbidité	Réduction des concentrations en éléments dissous	Acidification des eaux	Développement de la vie aquatique
Forêt de montagne	Nécessaire	?	Très positif	Très positif	Très positif	Positif	Très négatif	Positif
Forêt de plaine	Très négatif	?	Positif	Positif	Positif	Positif	Très négatif	Positif
Forêt alluviale	Nécessaire	Nécessaire	Positif	Positif	Positif	Très positif	Neutre	Positif
Ripisylve	Neutre	Nécessaire	Nécessaire	Neutre	Positif	Positif	Très positif	Très positif

: très positif
 : positif
 : neutre
 : négatif
 : très négatif

Problème pour la gestion forestière en milieu fragile.....

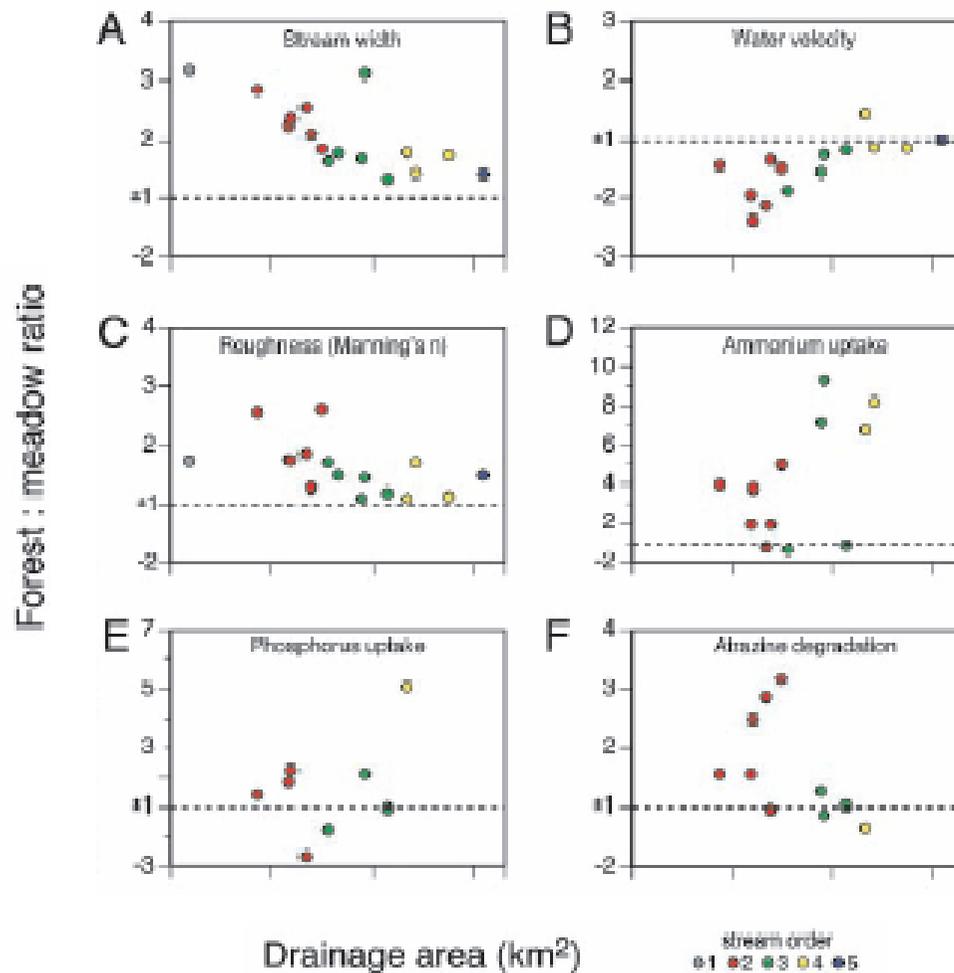
Des capacités épuratoires élevées

Comparaison de BV dont les zones ripariennes sont forestières ou prairiales

Piemont de l'Est des Etats Unis (Sweeney et al., PNAS 2004)

Le boisement des rives:

- Augmente la largeur des ruisseaux
- Réduit leur vitesse
- Augmente le prélèvement d'ammonium
- Augmente le taux de dégradation de l'atrazine
- Augmente le taux de macro-invertébrés



Ratio Bassin forestier/bassin agricole

(A) Largeur du cours d'eau (mètres) en étiage.

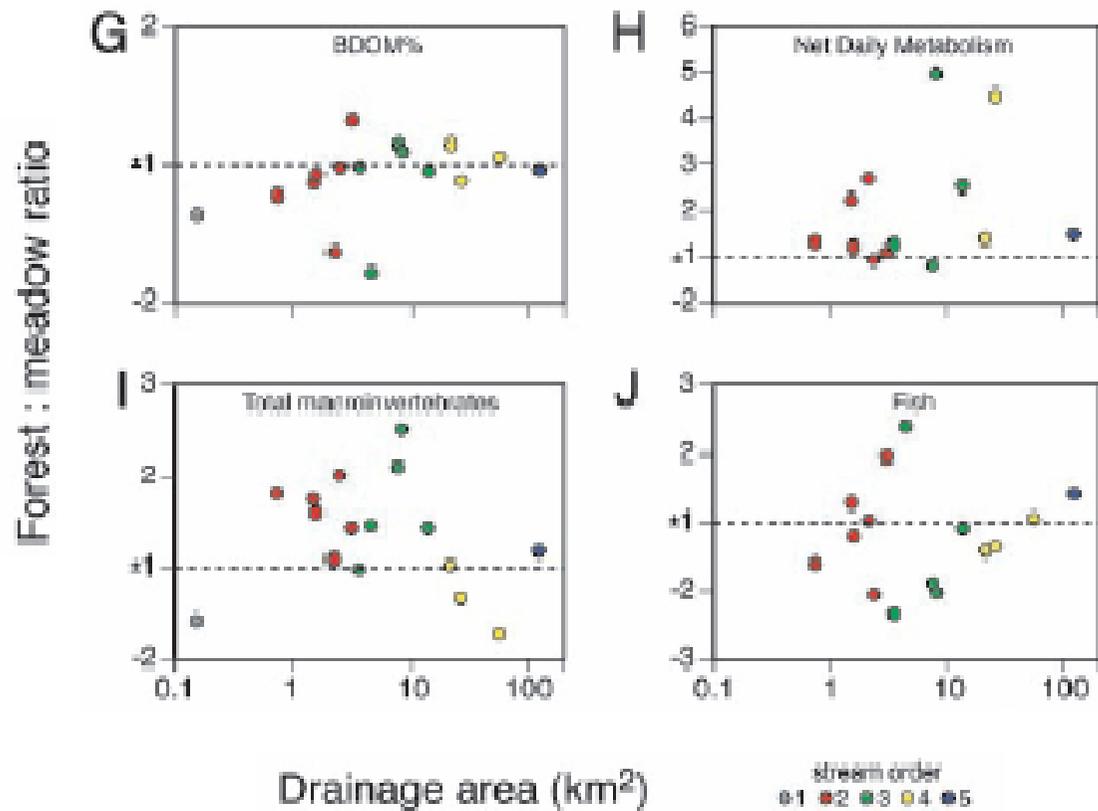
(C) Rugosité du lit (Manning's n).

(E) Prélèvement de Phosphore (m-1).

(B) Vitesse de l'eau (m²s-1).

(D) Prélèvement d'Ammonium

(F) Dégradation d'Atrazine (km-1).



Ratio Bassin forestier/bassin agricole dans des BV du Piémont de l'Est des Etats Unis

(Sweeney et al., PNAS 2004)

(G) Biodégradable Dissoute OM (%).

(H) NDM(g O₂/m³·j⁻¹).

(I) Macro-invertébrés (n/m³).

(J) poissons (n/m³).

Plus forte densité de poissons dans les ruisseaux prairiaux mais pas plus de poissons par mètre linéaire de ruisseau

La taille de la zone forestière riparienne influence fortement la qualité des ruisseaux

Si < à 15m: 9% des ruisseaux acceptables pour la truite

Si > 30 m: 63%

Jones et al. 2006,
Study of Georgia Piedmont streams





Merci pour votre attention