

Atelier REGEFOR 2013

—

‘La gestion de la fertilité des sols forestiers est-elle à un tournant ?’

Indicateurs de fertilité des sols forestiers
(tempérés) : intérêts et limites

Q. Ponette, A. Bispo, A. Brêthes, J.-L. Dupouey, I. Feix,
J.-C. Gegout, B. Jabiol, N. Pousse

Champenoux, 11 juin 2013

Fertilité des sols forestiers : une approche spécifique ?

Des indicateurs de fertilité : pour quoi ? pour qui ?
à quelles échelles ?

Quelles approches ?

Quels [paramètres/indices] indicateurs ?

Quelles combinaisons [de paramètres/indices]
d'indicateurs ?

Quelles qualités attendues des indicateurs ?



Fertilité des sols forestiers : une approche spécifique ?

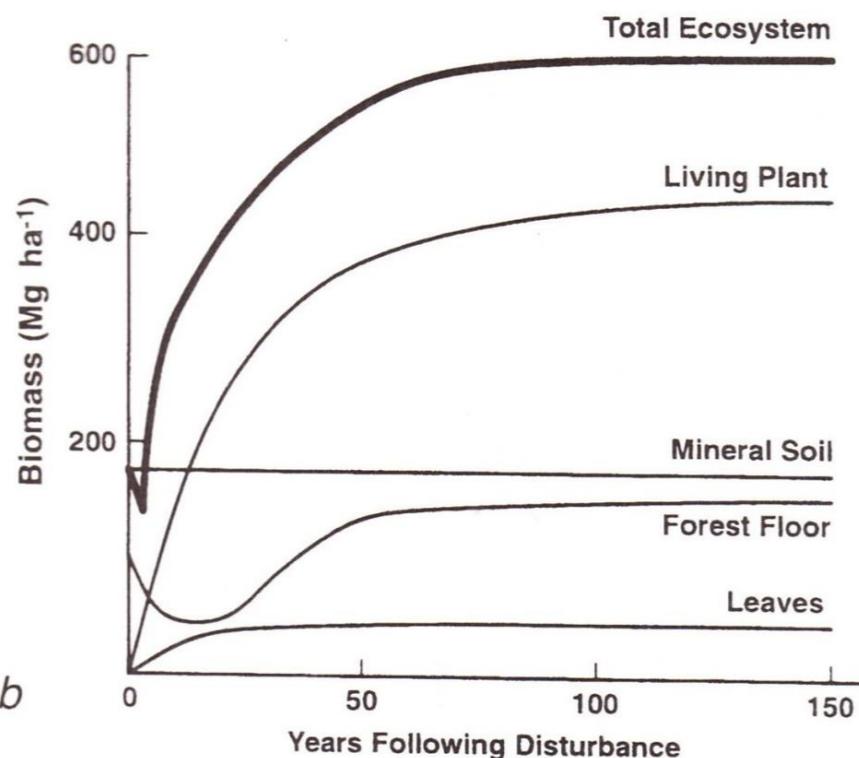
Spécificités

arbres, sols, gestion --> objectifs du diagnostic / suivi eux-mêmes !

Spécificités des arbres

long terme

faible anthropisation



Source : Barnes et al., 1998

Enjeux 'indicateurs'

- quand (stade de développement) mesurer ?
- empreintes \pm marquées sur le système : fertilité intrinsèque vs extrinsèque ?
- dynamique de réapprovisionnement du système capitale
- réserve en nutriments essentielle
- flux ponctuels potentiellement évolutifs et cumulatifs
- processus clés / zones cibles = $f(\text{temps})$

gestion des ressources

taille potentielle élevée



Fertilité des sols forestiers : une approche spécifique ?

Spécificités des arbres

long terme

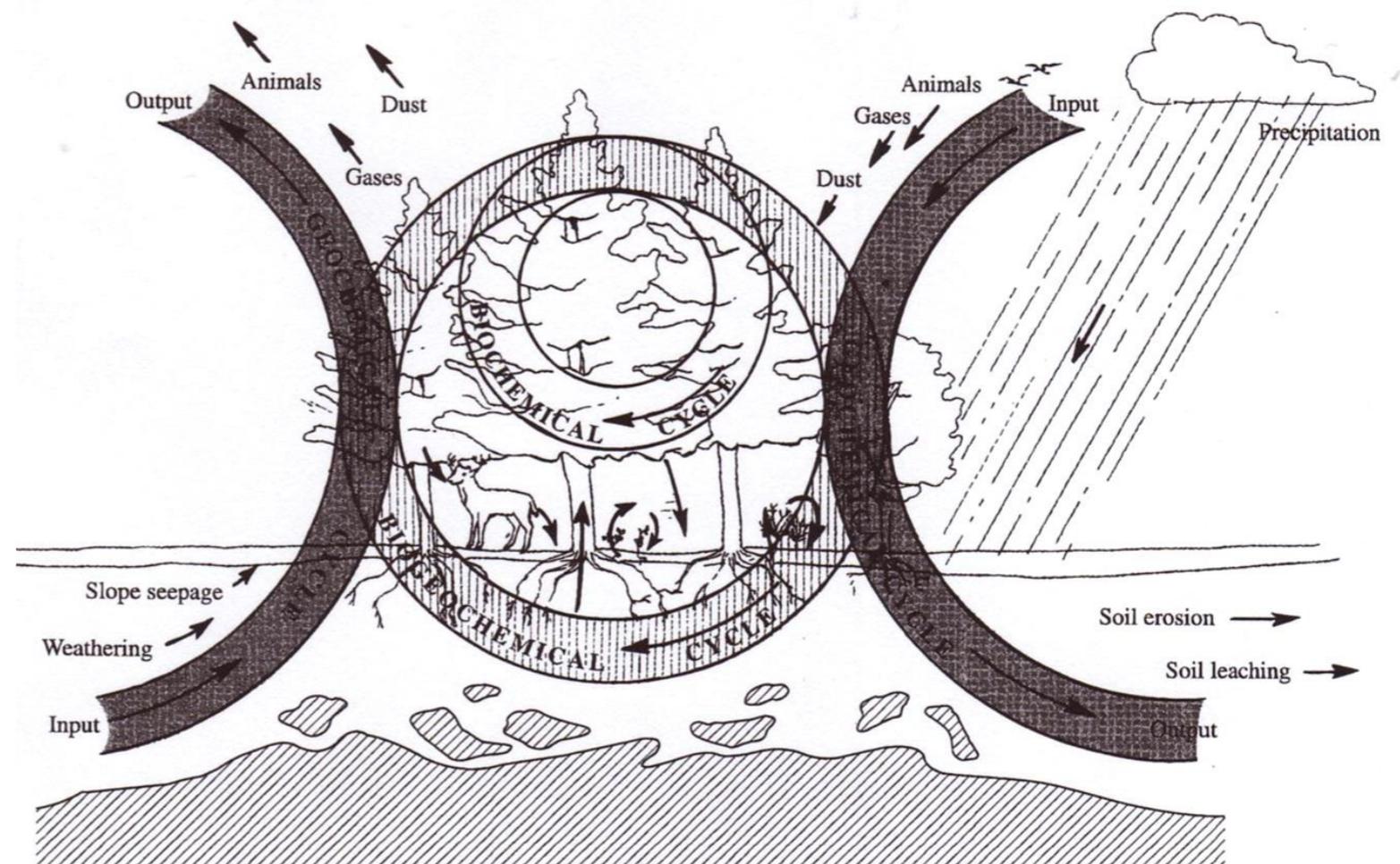
gestion des ressources

[p. ex, pour les nutriments : recyclage interne (retranslocation) / externe (plante-sol), capture des ressources, ...]

taille potentielle élevée

Enjeux 'indicateurs'

- part de la fertilité liée aux **traits** (stratégie) **de l'espèce** (\pm exprimés selon le site) ?
- part de la fertilité liée au **recyclage** ?



Source : Kimmins, 2004



Fertilité des sols forestiers : une approche spécifique ?

Spécificités des arbres

Enjeux 'indicateurs'

long terme

gestion des ressources

taille potentielle élevée



- où (plante : compartiments, tissus ;
sol : horizon(s) / couche(s)) mesurer ?
- faut-il intégrer spatialement (comment ?)
ou cibler des compartiments / zones 'clés'
(lequel(le)s) ?
- influence potentielle des couches profondes
(eau, nutriments)



Fertilité des sols forestiers : une approche spécifique ?

Spécificités des sols

hétérogénéité

(empreinte 'forêt',
faible anthropisation)

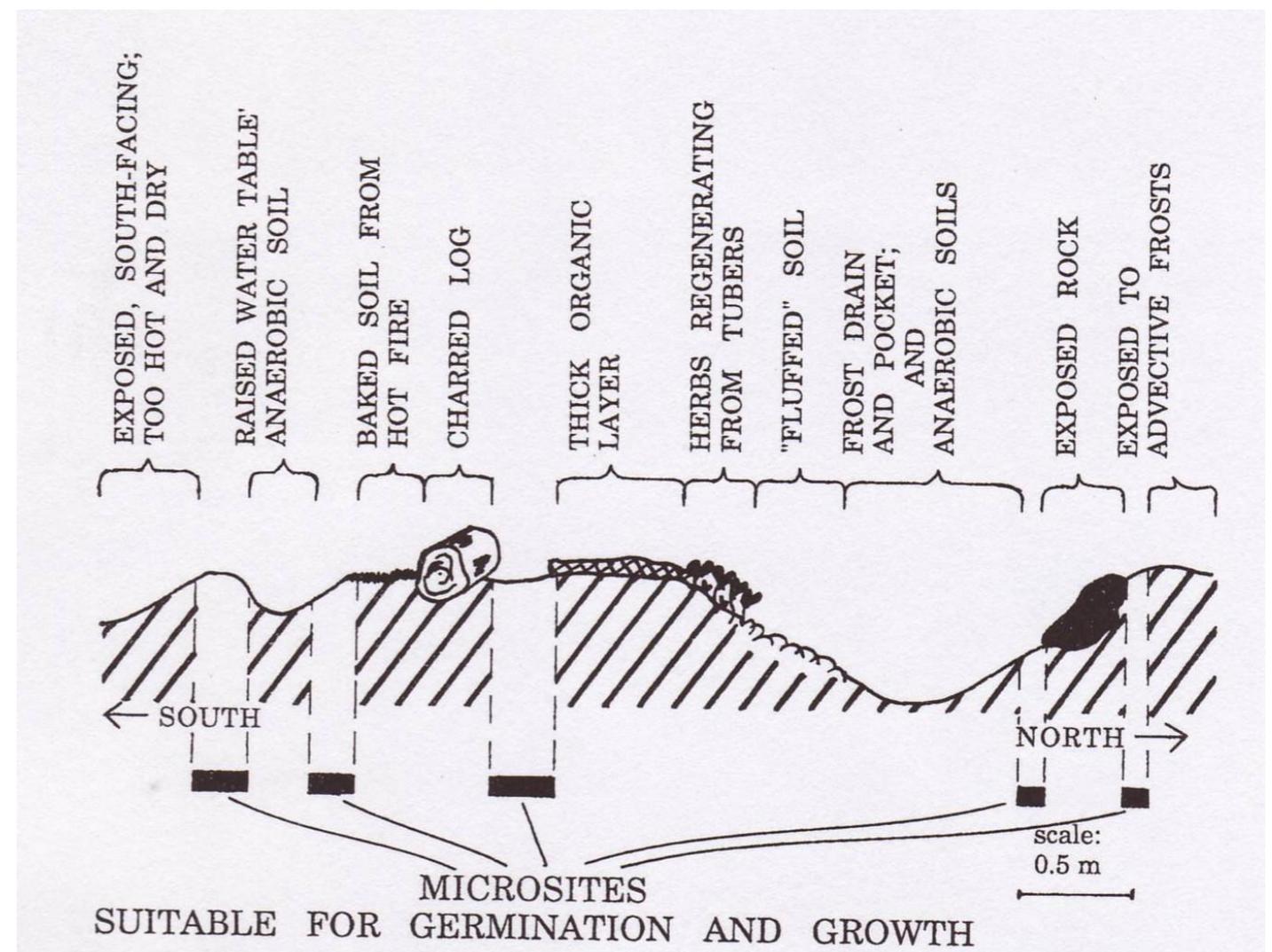
propriétés (chimiques)

contraintes *intrinsèques*

Spécificités de la gestion
anthropisation souvent
réduite

Enjeux 'indicateurs'

- où mesurer (verticalement, dans le profil ;
latéralement, dans la zone d'intérêt) ?



Source : Oliver et Larson, 1990



Fertilité des sols forestiers : une approche spécifique ?

Spécificités des sols

Enjeux 'indicateurs'

hétérogénéité

propriétés (chimiques)

(empreinte 'forêt',
faible anthropisation)

contraintes *intrinsèques*

- pH, C, (N), C/N : quelle **influence sur la fertilité** ?
- quelles **méthodes de mesure** utiliser ?
- quelles **conséquences** ces méthodes peuvent-elles engendrer ?

Spécificités de la gestion

anthropisation souvent
réduite



Fertilité des sols forestiers : une approche spécifique ?

Spécificités des sols

Enjeux 'indicateurs'

hétérogénéité

propriétés (chimiques)

contraintes *intrinsèques*

- comment les **intégrer** ?
- plus grande **sensibilité** (susceptibilité, résilience) aux 'perturbations' ?

Spécificités de la gestion

anthropisation souvent
réduite



Fertilité des sols forestiers : une approche spécifique ?

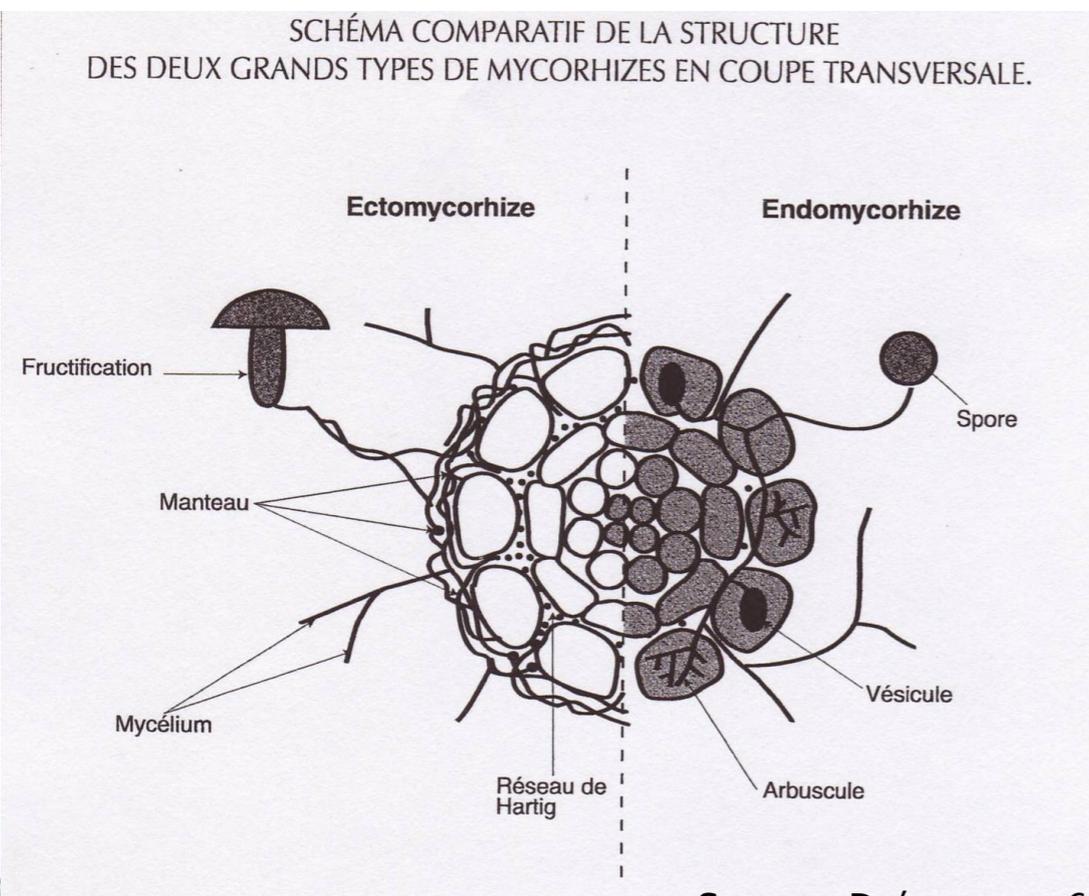
Spécificités des sols
hétérogénéité
propriétés (chimiques)
contraintes *intrinsèques*

Enjeux 'indicateurs'

Spécificités de la gestion

anthropisation souvent réduite

- contraintes *intrinsèques* peu modulées
- facteurs *externes*, non contrôlés, à forte influence potentielle
- importance relative élevée des processus biologiques



Source : Drénou, 2006



Des indicateurs de fertilité : pour quoi ? pour qui ? à quelles échelles ?

Objectifs du diagnostic

sélectionner des

- objectifs de gestion (p. ex. : protection, conservation, production, ...)
- itinéraires sylvicoles (longueur du cycle sylvicole / terme d'exploitabilité, travaux, éclaircies, coupes de régénération)
- scénarios / objectifs d'exploitation (niveau des exportations, méthodes d'exploitation)
- mesures complémentaires (prévention, restauration – p. ex. : fertilisation/amendements)

contribuer au choix de l'(des) espèce(s) principale(s)

évaluer la productivité (passée, actuelle, future) du site

quantifier l'évolution de la fertilité

évaluer la sensibilité des sols à des perturbations de différentes natures

Pour qui ?

A quelles échelles spatiales et temporelles ?



Des indicateurs de fertilité : pour quoi ? pour qui ? à quelles échelles ?

Objectifs du diagnostic

Pour qui ?

A quelles échelles spatiales et temporelles ?



Quelles approches ?

1. Ressources mobilisables vs demande (exigences/tolérances) des arbres
 - approche 'analytique'
- 2a. Réponse des organismes non ligneux
- 2b. Réponse des arbres
3. Approches 'mixtes'



Quelles approches ?

1. Ressources mobilisables vs demande (exigences/tolérances) des arbres
- 2a. Réponse des organismes non ligneux
 - présence/absence, abondance
 - fonctionnelle : activité des communautés cibles mesurée selon une palette de critères (morphologie, chimie, ...)
- 2b. Réponse des arbres
 - teneurs foliaires
 - productivité
3. Approches 'mixtes'



Quelles approches ?

1. Ressources mobilisables vs demande (exigences/tolérances) des arbres

2a. Réponse des organismes non ligneux

2b. Réponse des arbres

intérêts

1 - ne requiert pas de peuplement
- démarche fonctionnelle

2a - ne requiert pas de peuplement
- intégration

2b - intégration

limitations

- mise en œuvre ± complexe

- potentiellement affectée par d'autres facteurs que la fertilité *sensu stricto*

- nécessite un peuplement
- interprétation fonction de l'espèce

3. Approches 'mixtes'



Quelles approches ?

Disponibilité vs demande – ressources mobilisables

disponibilité =

niveau des ressources
eau, éléments

+

aptitude de la plante
au prélèvement

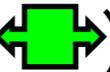
dimension du réservoir ()

enracinement fonctionnel

- profondeur maximale

- densité

'forme' des ressources

dynamique du réservoir ()

recyclage (éléments minéraux)

apports/sorties 'externes'

(éléments minéraux, eau)

niveau des ressources ()

niveau des contrôleurs ()

oxygénation

climat (<>niveau des ressources)

(...)



Quelles approches ?

Disponibilité vs demande – ressources mobilisables

niveau des ressources

dimension du réservoir ()

enracinement fonctionnel

- profondeur maximale

- densité / distribution

'forme' des ressources

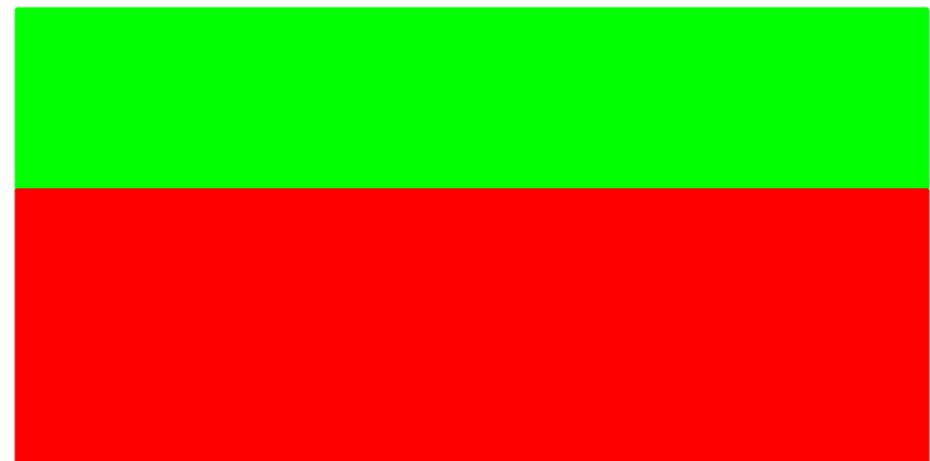


dynamique du réservoir

recyclage (éléments minéraux)

apports/sorties 'externes'

(éléments minéraux, eau)



Quelles approches ?

Disponibilité vs demande – ressources mobilisables

niveau des ressources

dimension du réservoir ()

enracinement fonctionnel

- profondeur maximale

- densité / distribution

'forme' des ressources

dynamique du réservoir

recyclage (éléments minéraux)

apports/sorties 'externes'

(éléments minéraux, eau)



Quelles approches ?

Disponibilité vs demande – ressources mobilisables

niveau des ressources

dimension du réservoir ()

enracinement fonctionnel

- profondeur maximale

- densité / distribution

'forme' des ressources

dynamique du réservoir

recyclage (éléments minéraux)

apports/sorties 'externes'

(éléments minéraux, eau)



Quelles approches ?

Disponibilité vs demande – ressources mobilisables

niveau des ressources

dimension du réservoir

enracinement fonctionnel

- profondeur maximale

- densité / distribution

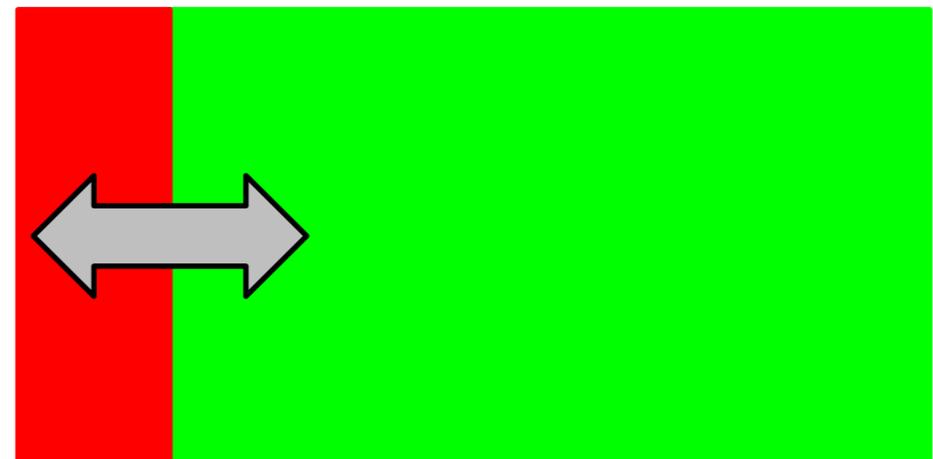
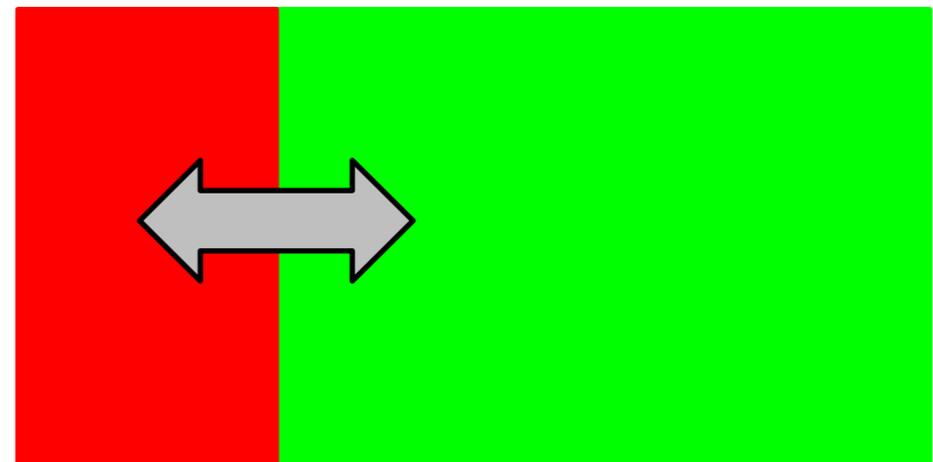
'forme' des ressources

dynamique du réservoir (↔)

recyclage (éléments minéraux)

apports/sorties 'externes'

(éléments minéraux, eau)



flux 'actifs'



Quelles approches ?

Disponibilité vs demande – ressources mobilisables

niveau des ressources

dimension du réservoir

enracinement fonctionnel

- profondeur maximale

- densité / distribution

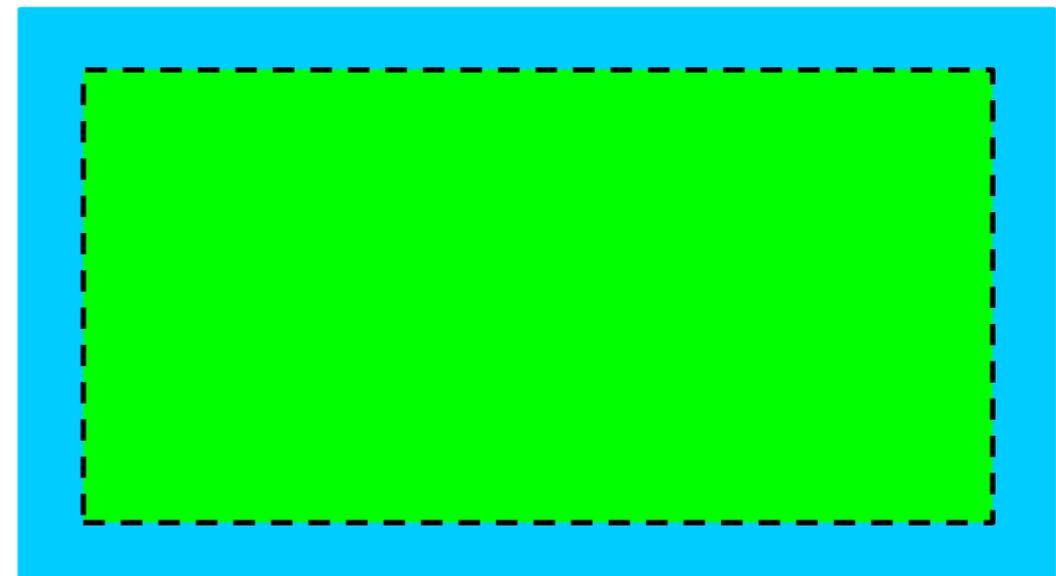
'forme' des ressources

dynamique du réservoir (↔)

recyclage (éléments minéraux)

apports/sorties 'externes'

(éléments minéraux, eau)



'fond de réapprovisionnement'



Quels Indicateurs ?

Prospection (■) et activité (□, ►) racinaires

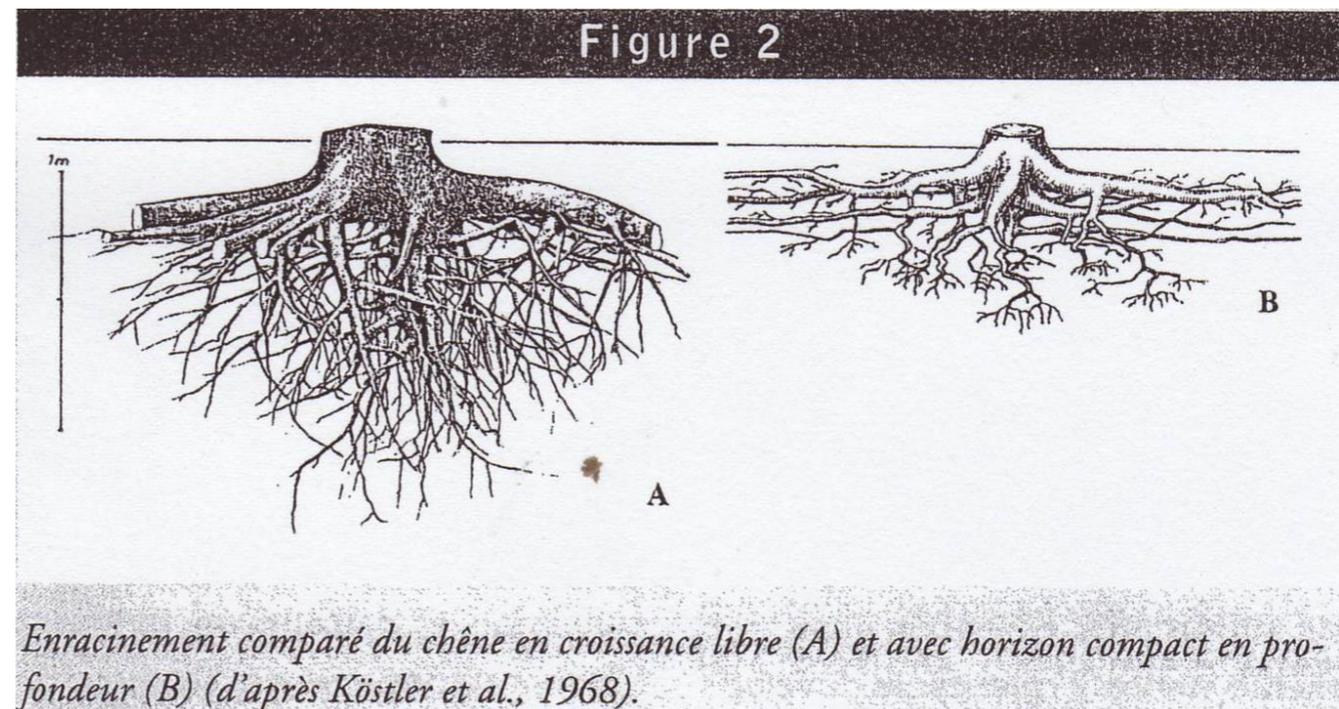
Principes

- identification des principales contraintes et de leur niveau
- modulation du niveau des contraintes selon l'espèce

Principales contraintes

- contraintes physiques
- aération
- contraintes chimiques (déficit, excès, antagonismes)

Indicateurs



Quels Indicateurs ?

Prospection (■) et activité (□, ➡) racinaires

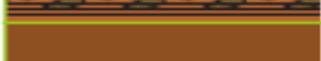
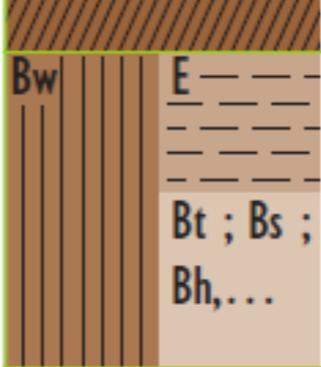
Principes

Principales contraintes

Indicateurs

- le plus souvent, complexes à estimer :
ouverture d'une (mini-)fosse
tests/mesures/observations
interprétation parfois délicate
- dans certains cas, variables auxiliaires disponibles

Description des horizons d'un sol*

	OL	Horizons organiques* (nombre variable)	"Humus"
	OF		
	OH		
	A	Horizon d'incorporation de la matière organique	
	Bw, E, B	Horizons (minéraux le plus souvent) d'altération en place (Bw), éluviaux (E) ou illuviaux B	Horizons de diagnostic
	BC		Horizons de transition
	C	Horizons minéraux de profondeur	Roche-mère altérée
	R		Roche-mère peu altérée, dure siliceuse (1) ou calcaire (2)

* Horizon OL : litière de feuilles ou aiguilles ;
Horizon OF : couche de fragmentation des feuilles par la faune ;
Horizon OH : couche d'humification (transformation des fragments par la microfaune, les champignons, les bactéries).



Quels Indicateurs ?

Prospection (■) et activité (□, ►) racinaires

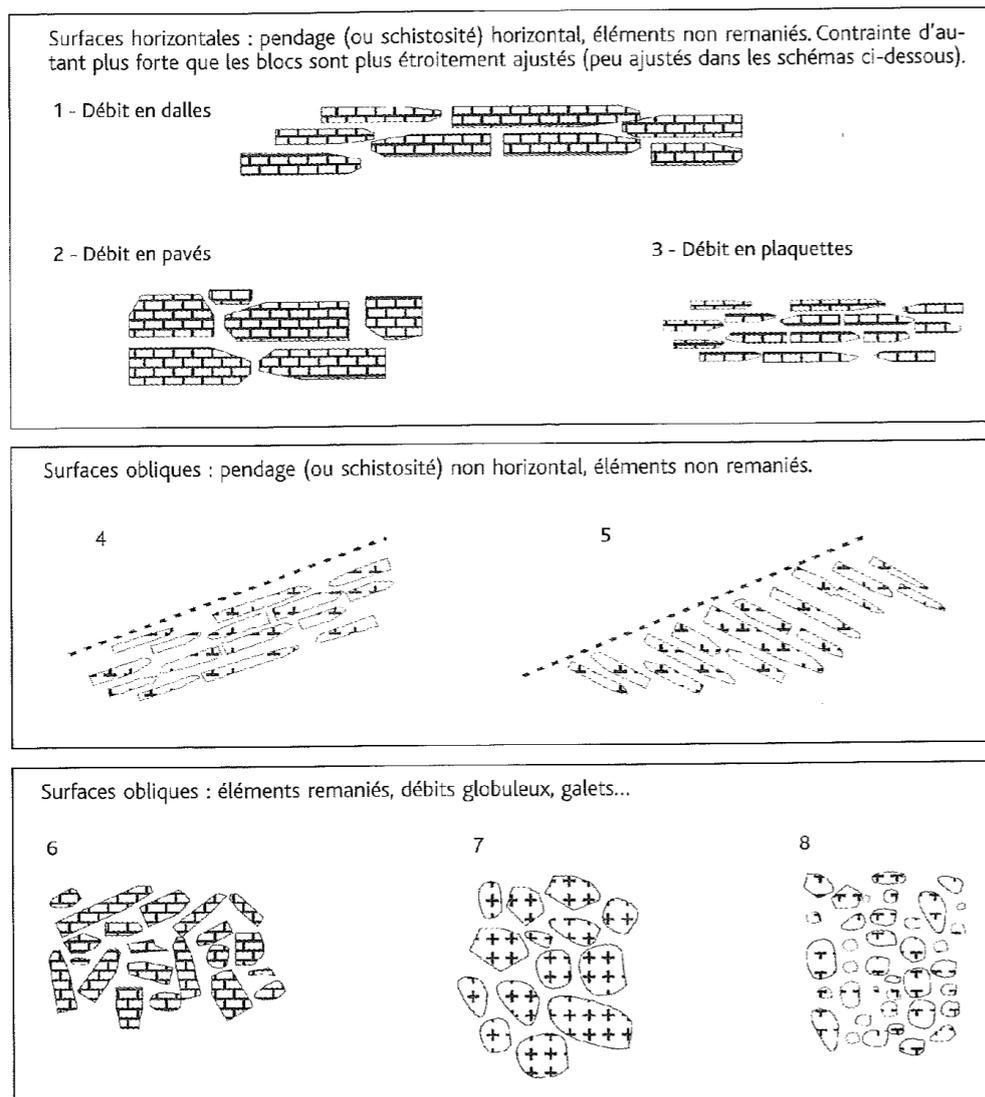
Contraintes physiques

Indicateurs, commentaires

- charge caillouteuse

- contrainte très variable selon proportion, géométrie, disposition distribution verticale
- en faible proportion, peut limiter la compacité
- diagnostic : cartes, profil, (sondage)

FIGURE 5 : Niveaux d'obstacles dus aux éléments grossiers en fonction de leur forme, taille, disposition. Les différents cas sont classés par niveaux de contrainte décroissants. Il s'agit d'un niveau de contrainte pour le développement racinaire dans l'horizon considéré.



Source : Jabiol et al., 2009



Quels Indicateurs ?

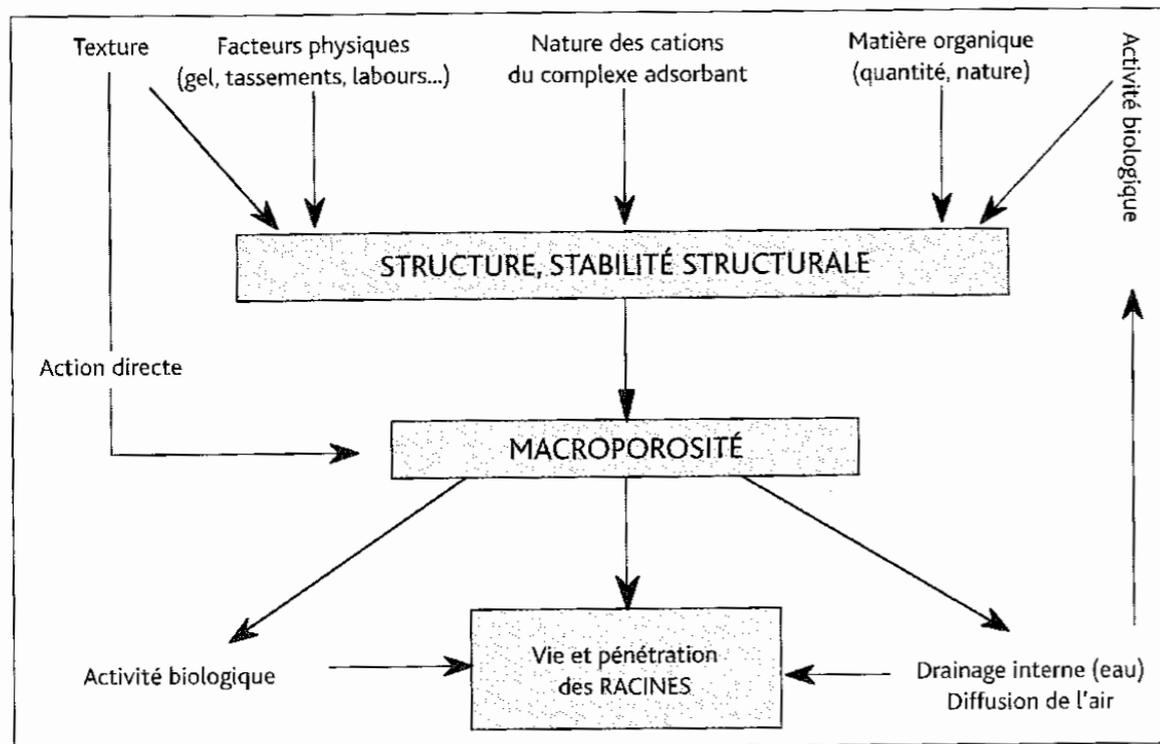
Prospection (■) et activité (◻, ►) racinaires

Contraintes physiques

- macroporosité

Indicateurs, commentaires

FIGURE 3 : Paramètres influant sur les qualités physiques du sol



Source : Jabiol et al., 2009

- compacité, induration

m. limoneux : tassement

[anthropique, naturel]

m. argileux : structure

- diagnostic :

résistance à la pénétration sur sol humide

présence d'un horizon induré



Quels Indicateurs ?

Prospection (■) et activité (□, ►) racinaires

Aération ([C] et diffusion O₂)

- macro-porosité
- régime hydrique



Indicateurs, commentaires

- contrainte très variable selon profondeur, oxygénation et fluctuations temporelles de la nappe
- diagnostic :
 - morphologie du profil
 - traces d'hydromorphie spécifiques
 - humus spécifiques (anmoor, hydromor ; hydro mull|moder|mor)
(accumulation matière organique)
 - végétation
- rq : effective vs fossile

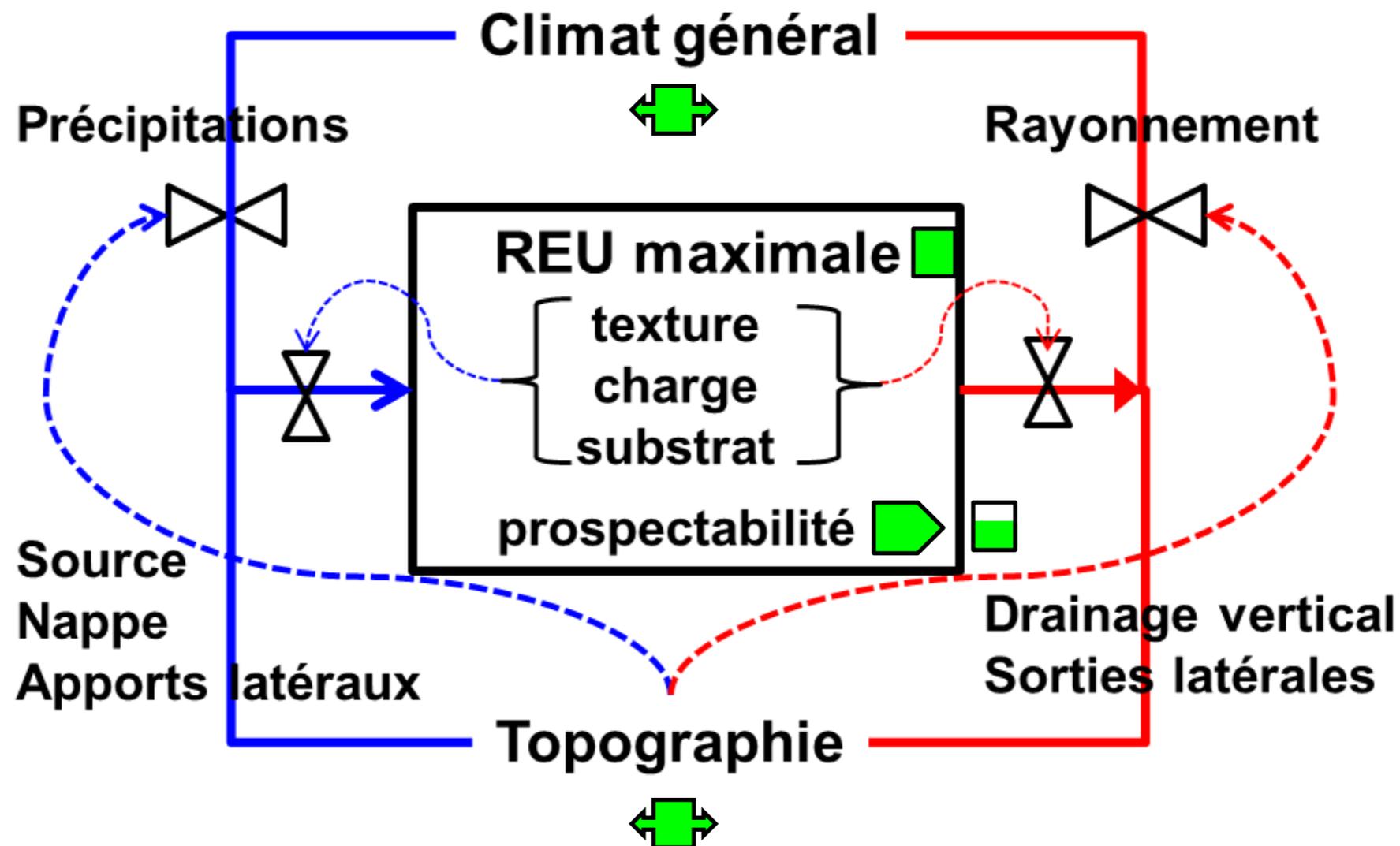
Contraintes chimiques (déficit, excès, antagonismes)

- (pH), carbonates (calcaire 'actif'), aluminium, ETM, salinité



Quels Indicateurs ?

Alimentation hydrique Principes



Quels Indicateurs ?

Alimentation hydrique

Réservoir (maximal) ■

Indicateurs, commentaires

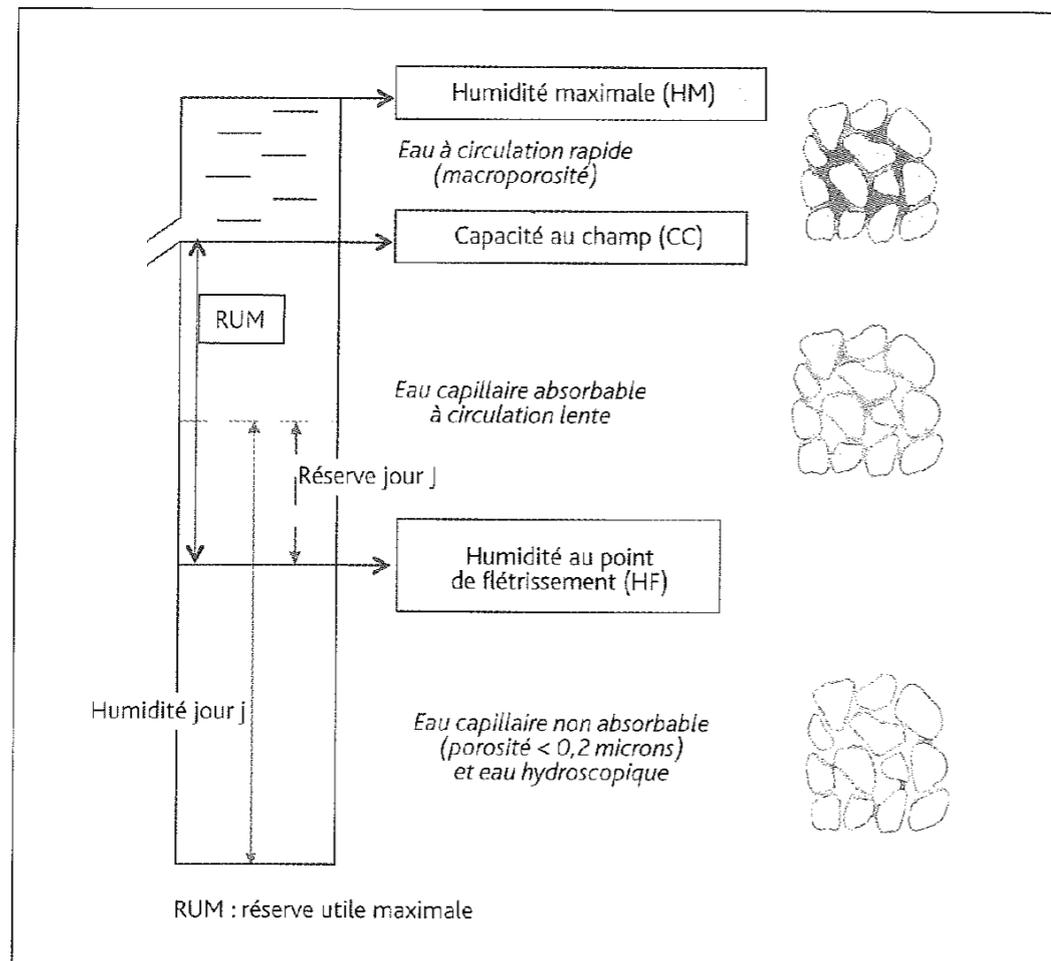
- texture

- éléments grossiers

+ prospection
racinaire

→ RUM

FIGURE 8 : Localisation de l'eau dans la porosité du sol
Le rectangle vertical correspond à la totalité de la porosité du sol, susceptible de se remplir d'eau.
Il peut être considéré comme un bidon percé laissant s'écouler l'eau à déplacement rapide.



Source : Jabiol et al., 2009



Quels Indicateurs ?

Alimentation hydrique

Dynamique du réservoir (in/out)

dynamique 'moyenne'

- topographie

- climat général / topoclimat (P, ETP)

dynamique 'intra-annuelle'

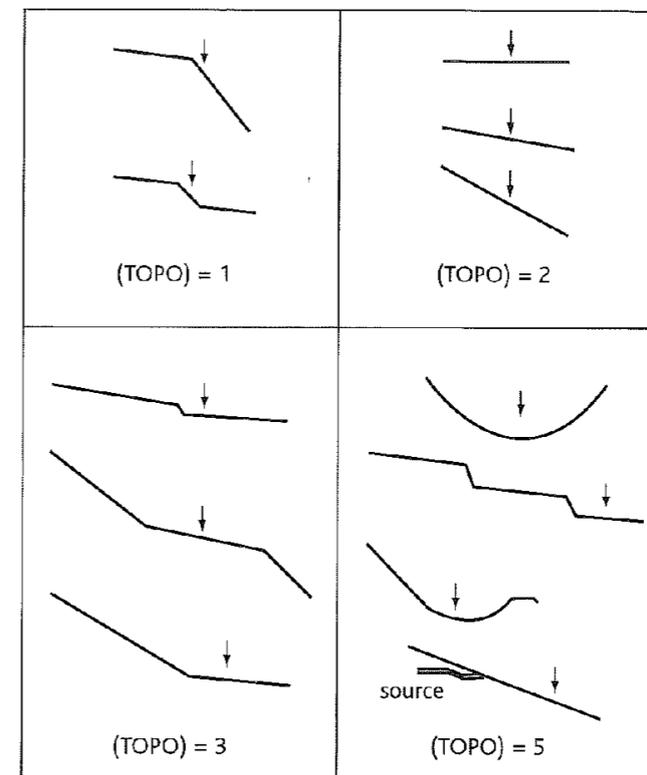
Indicateurs, commentaires

- indices qualitatifs
- indices quantitatifs spatialisés

- modèles de bilan hydrique

FIGURE 14 : Indice topographique caractérisant le bilan des apports et des pertes d'eau par approvisionnement latéral. La flèche indique la position de la station sur la pente.

Source : Le Goff et Lévy, *Annales des Sciences forestières*, n° 2, 1984.
Reproduit avec l'aimable autorisation de la Rédaction des *Annals of Forest Science*



Valeur 1 de l'indice : pertes latérales supérieures aux apports latéraux ;

Valeur 2 de l'indice : apports et pertes nuls ou apports égaux aux pertes ;

Valeur 3 de l'indice : la circulation latérale se ralentit au niveau de la placette, les apports sont supérieurs aux pertes ;

Valeur 5 de l'indice : approvisionnement en eau exceptionnel (indice à signification quantitative : pas de valeur 4, voir figure 15, ci-dessous).

Source : Jabiol et al., 2009



Quels Indicateurs ?

Alimentation minérale

Teneurs/forme - ? - → Réservoir ■

Indicateurs, commentaires

- pH

- essentiel mais interprétation complexe !
influence de nombreux processus :
solubilité [avec le pE] de nombreux éléments
[toxicités, carences], charge des surfaces, altération,
activité biologique, ...
est affecté par de nombreux processus
- diagnostic :
mesure directe
végétation

- 'bases'

- N, P



Quels Indicateurs ?

Alimentation minérale

Teneurs/forme - ? - → Réservoir ■

Indicateurs, commentaires

- pH

- 'bases'

- diagnostic :

pH, effervescence à l'HCl (terre fine, EG)

végétation

mesure directe (échangeables, S/T) + normes

teneurs foliaires + seuils, symptômes

(développement de profil)

- N, P

- N : indicateurs 'sols' instantanés inefficaces

- P : extractions 'sélectives' + autre(s) facteur(s)

- N, P : teneurs foliaires + seuils, symptômes



Quels Indicateurs ?

Alimentation minérale

Dynamique – recyclage sol-plante ↔ Indicateurs, commentaires

- ('Bases'), Ca
- N(, P)

- (formes d'humus) + autre(s) facteur(s)
- (formes d'humus) + autre(s) facteur(s)
- C/N
 - un des facteurs affectant la minéralisation (fiabilité ↑ si C/N combiné avec autres variables telles que pH)
 - horizon / couche de référence ?
- végétation
 - valeurs Ellenberg étroitement liées à la nitrification (mais $N-NH_4^+/N-NO_3^-$ opt = $f(\text{essence})$!)

Dynamique – apports / sorties 'externes'

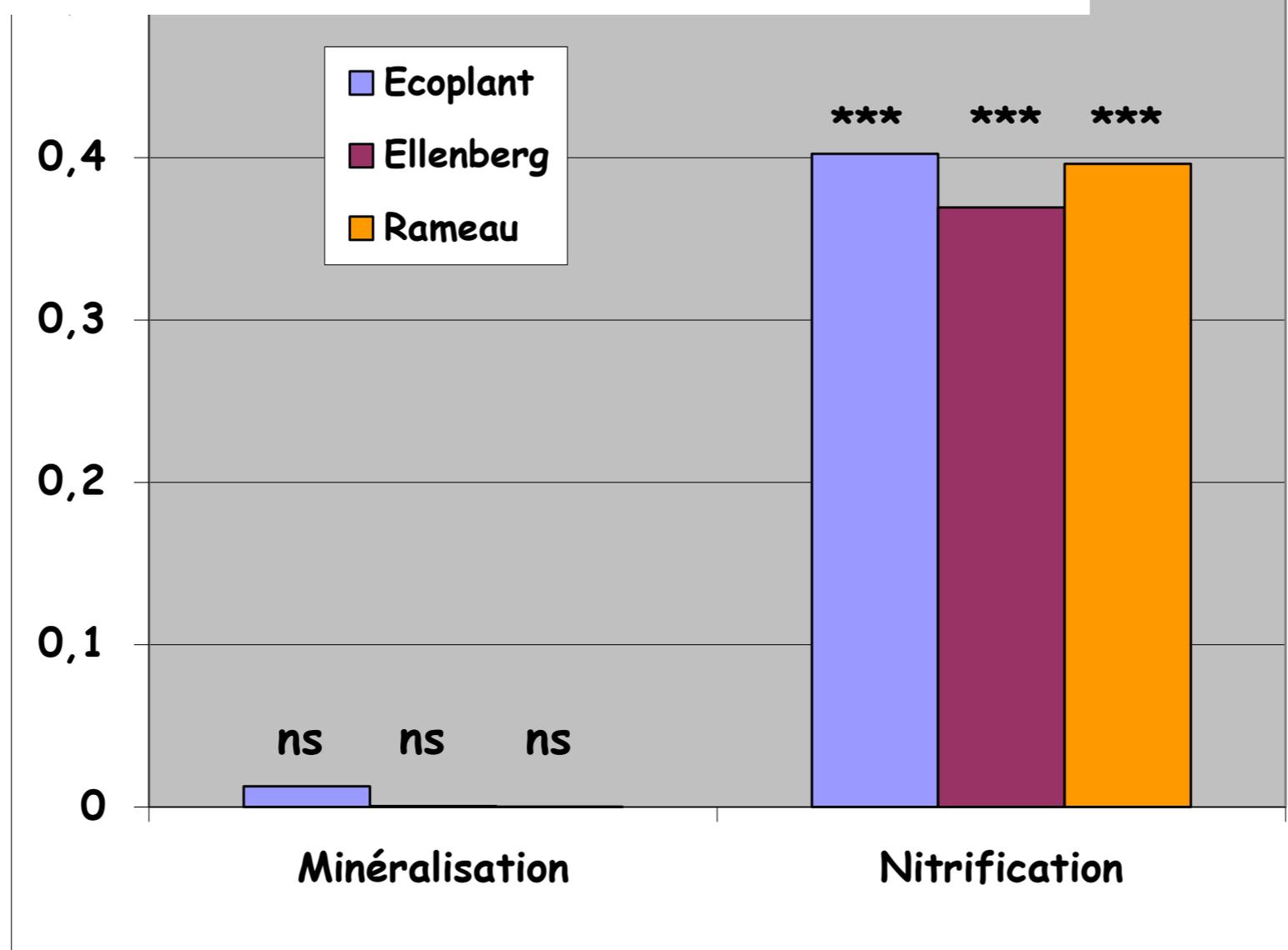


Quels Indicateurs ?

Alimentation minérale

Dynamique – recyclage sol-plante ↔

R² entre valeurs indicatrices et mesures azote sol



Galeopsis tetrahit

n=45 sites

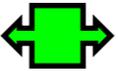
Andrianarisoa *et al.*, Forest Ecology & Management, 2009



Quels Indicateurs ?

Alimentation minérale

Dynamique –

apports / sorties 'externes' 

- 'bases'

- N, P

Indicateurs, commentaires

- altération :
nature de la charge caillouteuse, nature du matériau parental / substrat, lithologie, texture-minéralogie
- apports atmosphériques
modèles de retombées
- apports atmosphériques
modèles de retombées
N : fixation / dénitrification



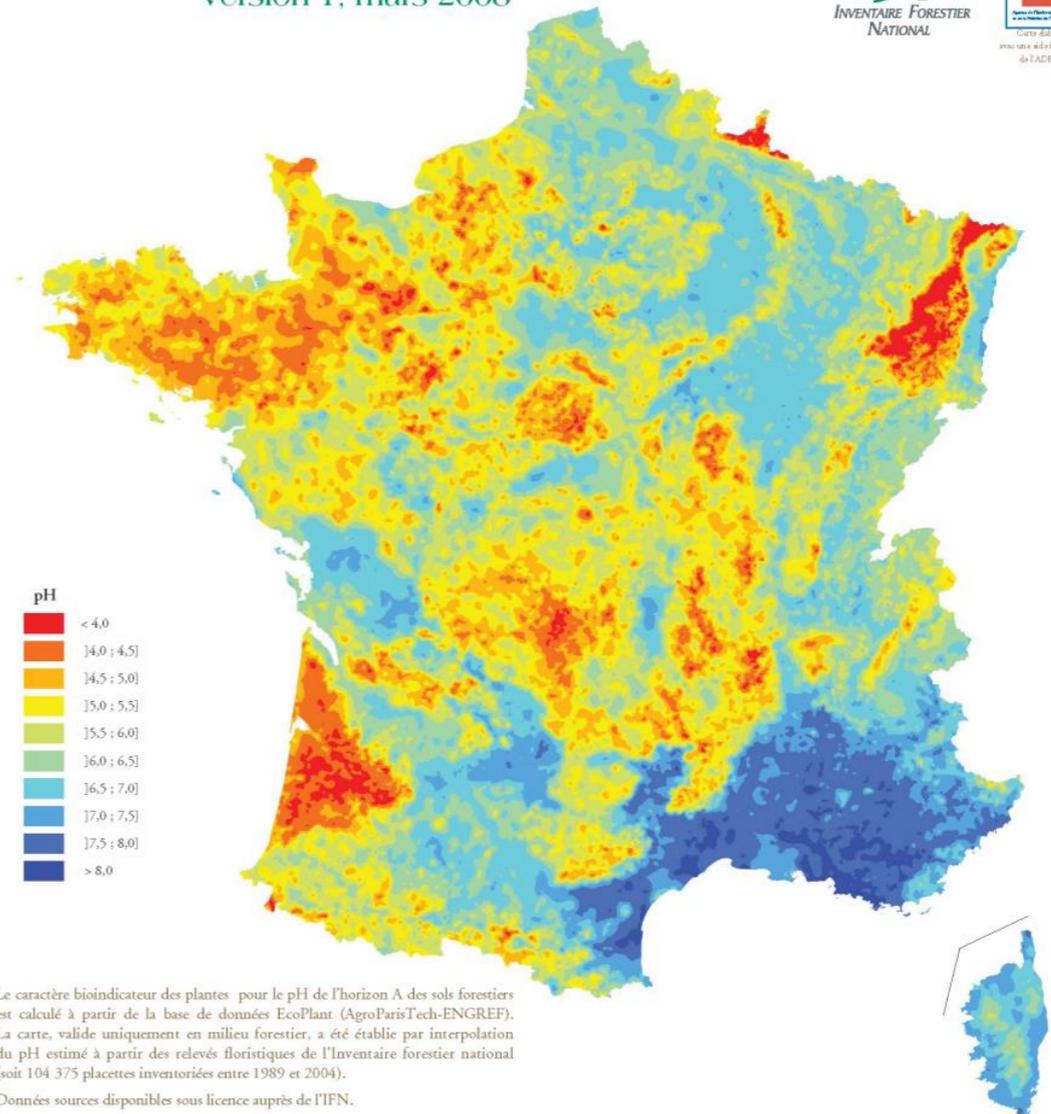
Quels Indicateurs ? Végétation

Principes

- climat : température + sécheresse
- acidité du sol
- lumière
- stade dynamique
- disponibilité en azote

- (bilan hydrique local)
- (tassement + engorgement)
- (salinité)
- (métaux lourds)
- ...

Carte du pH de surface des sols forestiers français estimé par le caractère bioindicateur de la flore spontanée
Version 1, mars 2008



Le caractère bioindicateur des plantes pour le pH de l'horizon A des sols forestiers est calculé à partir de la base de données EcoPlant (AgroParisTech-ENGREF). La carte, valide uniquement en milieu forestier, a été établie par interpolation du pH estimé à partir des relevés floristiques de l'Inventaire forestier national (soit 104 375 placettes inventoriées entre 1989 et 2004).

Données sources disponibles sous licence auprès de l'IFN.

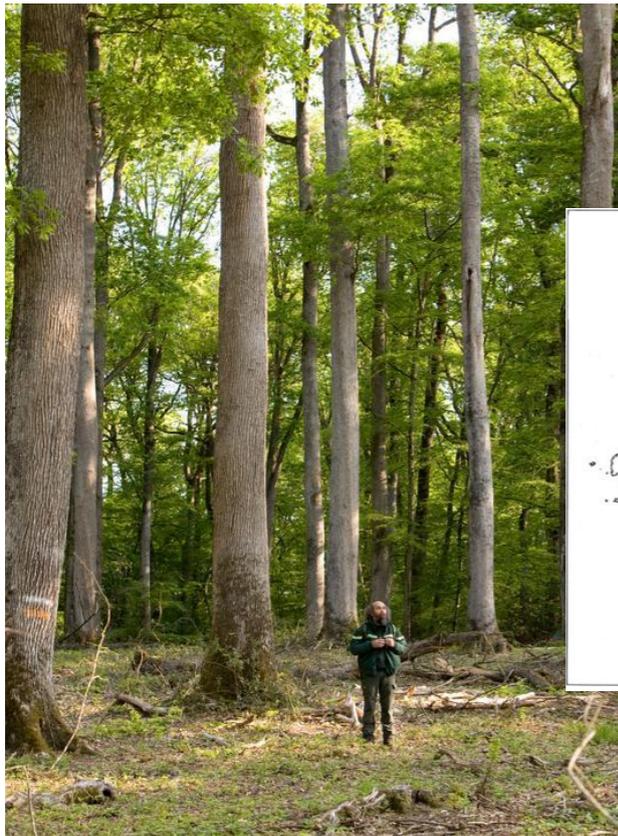
UMR INRA - ENGREF 1092
Laboratoire d'Etude des Ressources
Forêt-Bois (LERFOB)
Equipe Ecologie Forestière
14 rue Girardet, CS 14216
54042 Nancy Cedex
LERFOB

INVENTAIRE FORESTIER
NATIONAL
Carte de la France
avec une aide financière
de l'ADEME



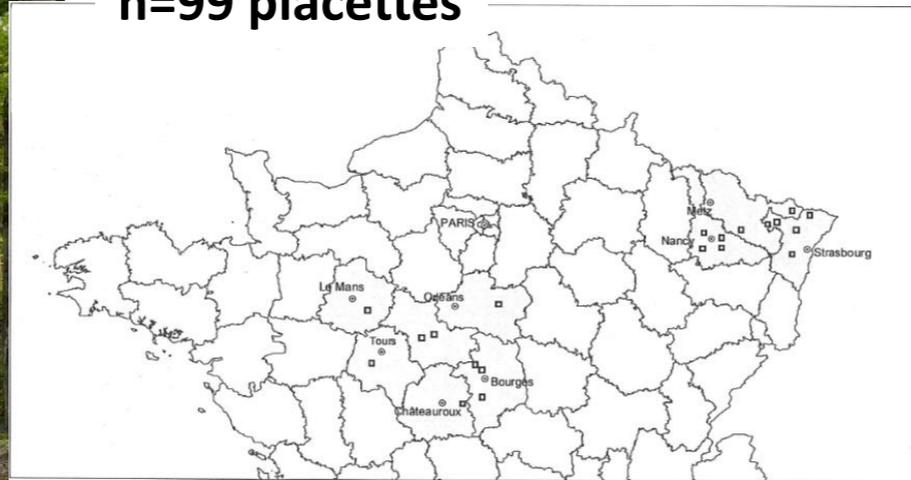
Quels Indicateurs ? Végétation

- fertilité des peuplements
- paramètres / variables spécifiques



Tronçais, N. Petrel ONF

Chêne sessile, Centre et Est de la France
n=99 placettes

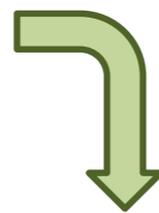
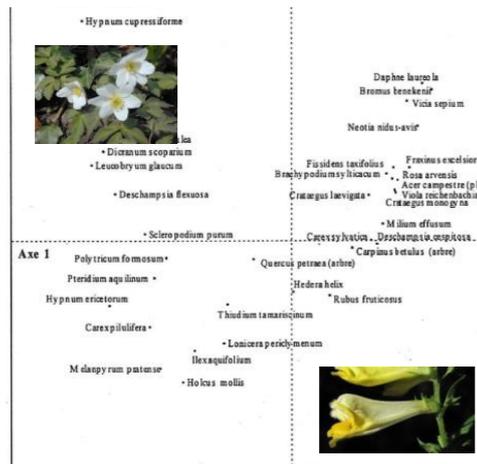


Bergès et al., 2006

Indice de fertilité
(Hdom 100 ans)

modèle physico-chimique :
réserve utile
+ concentration en magnésium
+ type d'humus

bio-indication :
3 premiers axes factoriels
de l'AFC flore



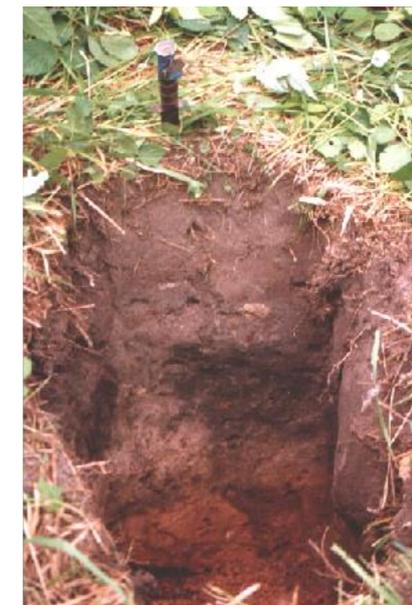
$R^2=55\%$

1 seul axe
factoriel :
 $R^2=46\%$



$R^2=60\%$

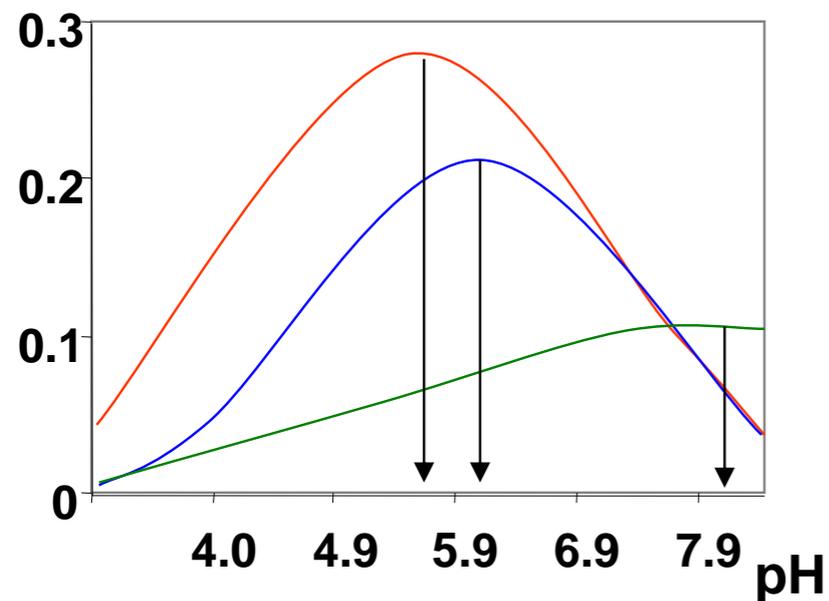
type d'humus
seul :
 $R^2=31\%$



Quels Indicateurs ? Végétation

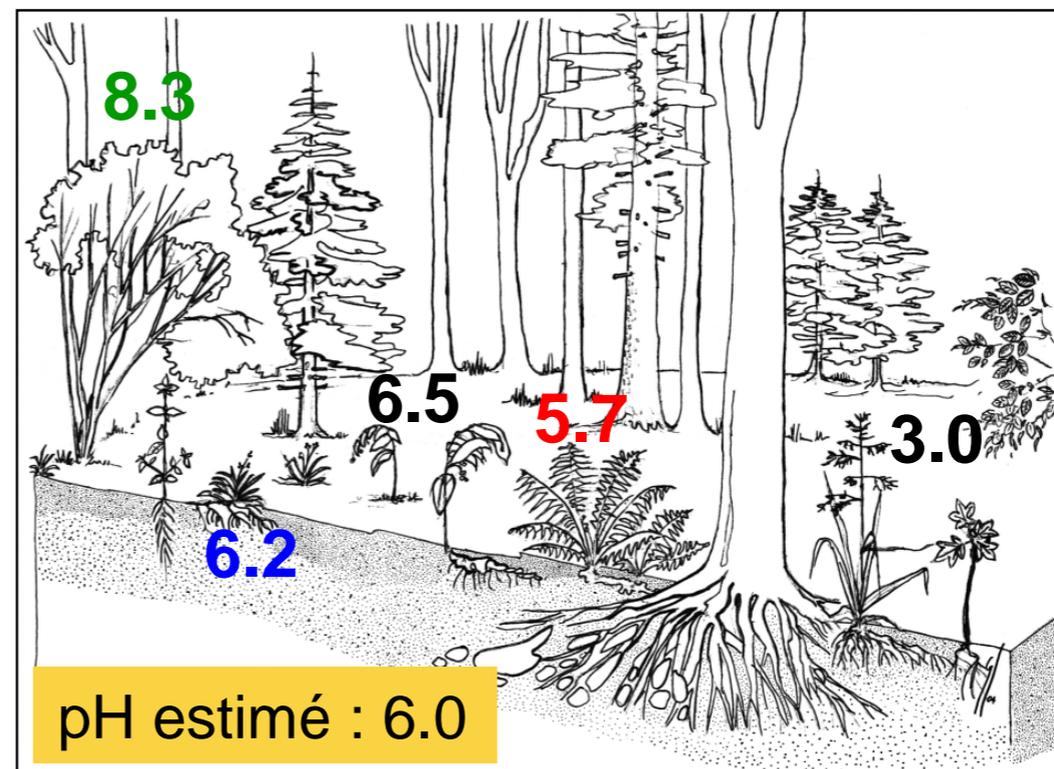
- fertilité des peuplements
- paramètres / variables spécifiques

Courbes de réponse et valeurs indicatrices des espèces



- *Dryopteris filix-mas*
- *Melica uniflora*
- *Sambucus nigra*

Relevé floristique en présence/absence sur 400 m² (100 à 1000)



Ellenberg, (1974), ter Braak, C. J. F. & Barendregt, L. G. (1986)

Valeur prédite :

Moyenne des valeurs indicatrices de toutes les espèces du relevé

- prédictions : pH, C/N, bases échangeables, S/T, toxicité Al
- valeurs indicatrices pour toutes les espèces communes de la flore forestière françaises (518 à 568 selon les variables)



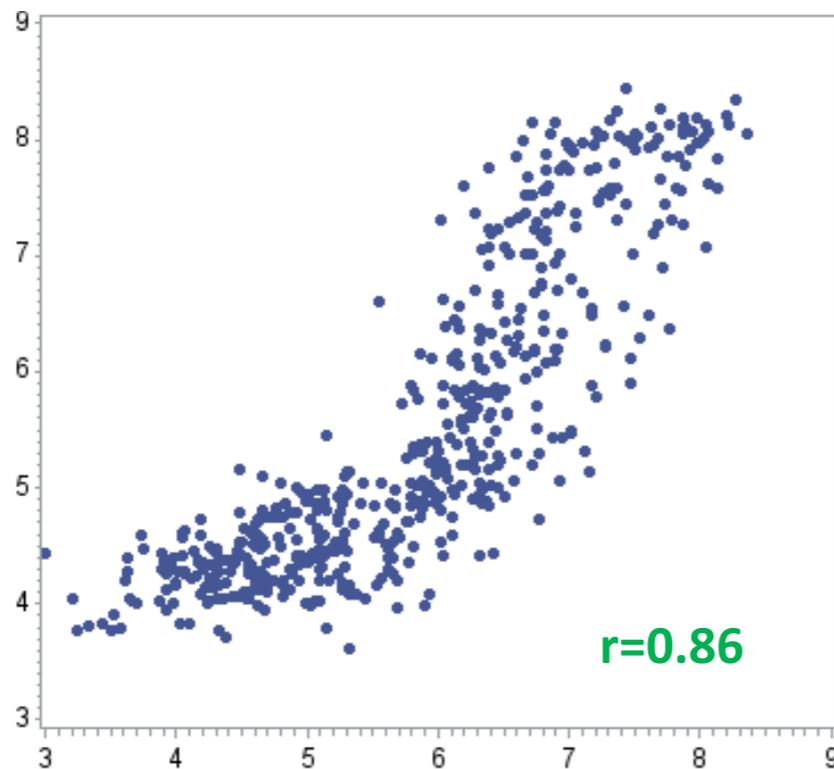
Quels Indicateurs ? Végétation défis, limitations



Le défi : passer de la bio-indication des variations spatiales (qui marche !) à la bio-indication des variations temporelles

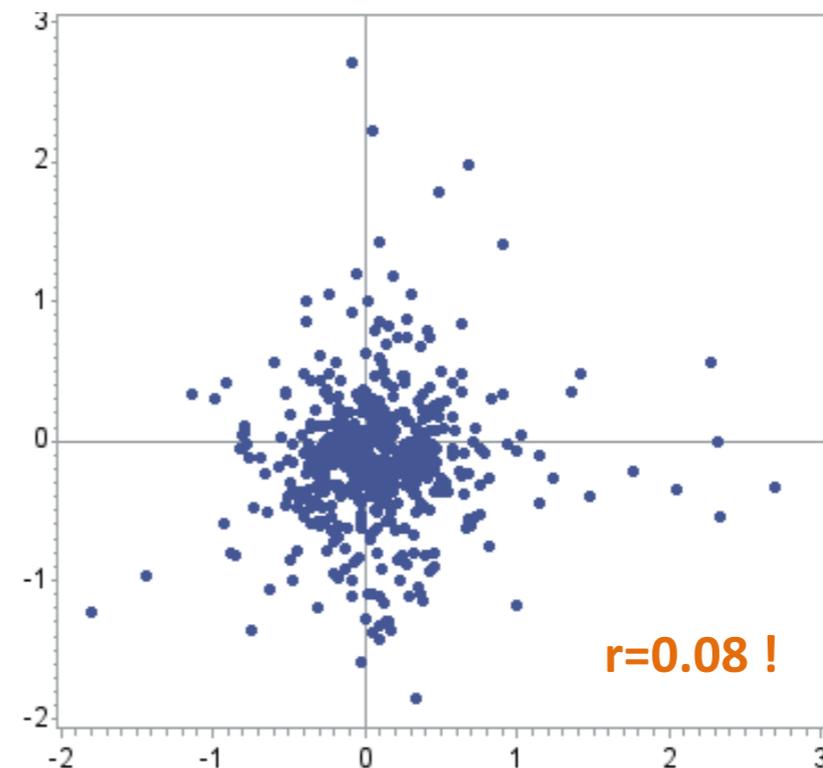
Réseau européen BioSoil : 1994 puis 2006, 545 sites

pH du sol mesuré en 2006



pH bio-indiqué en 2006

Variation 1994-2006 du pH du sol mesuré



Variation 1994-2006 du pH bio-indiqué

Rabastens, 2009



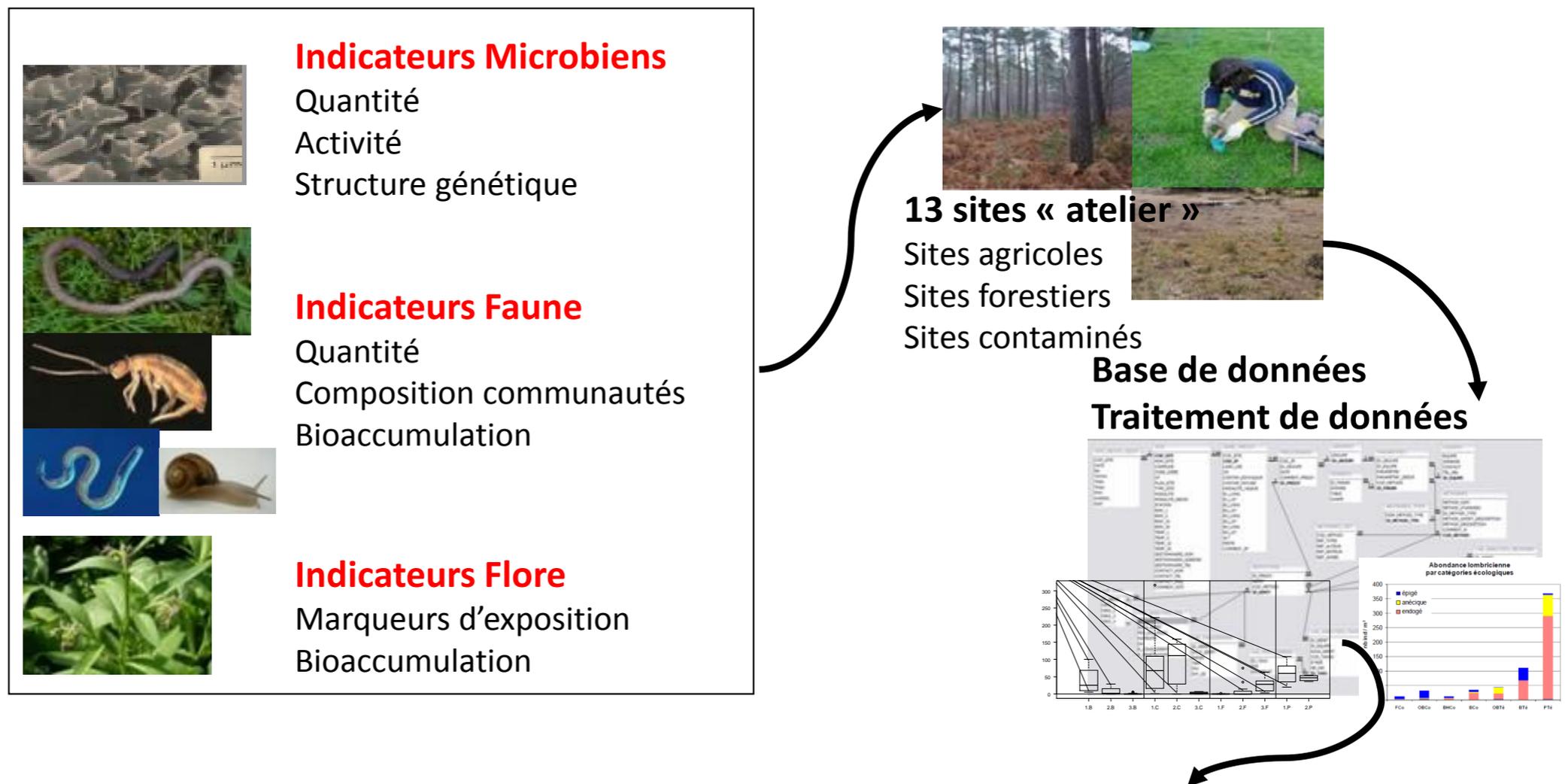
Quels Indicateurs ?

Biologie du sol

Programme

Le programme ADEME

« Bioindicateurs de qualité des sols) (2004-2012)



D'après : G. Péres, coordinatrice du programme (Université de Rennes 1)

Proposition d'indicateurs & référentiels



Quels Indicateurs ?

Biologie du sol

Intérêts

- bioindiquer des fonctions / processus clés de la fertilité des sol, peu/mal pris en compte par d'autres indicateurs
- ex : **organismes** clés associés au **recyclage de la matière organique** et à la mise à disposition des éléments nutritifs pour les plantes ;
organismes affectant l'**aération** / les **propriétés physiques** des sols ;
activités enzymatiques ou gènes traduisant la capacité de **dégrader la MO** ou intervenant dans le **cycle de l'azote**.

Besoins	Famille	Paramètres
Sols forestiers (premiers éléments)	Microbiologie	Abondance : biomasses bactérienne & fongique Diversité des communautés Activités : laccases, lipases, galactosidase
	Faune	Diversité fonctionnelle des nématodes Diversité des collemboles et des acariens Indice Biologique de la Qualité des Sols (<i>basé sur la macrofaune totale</i>)

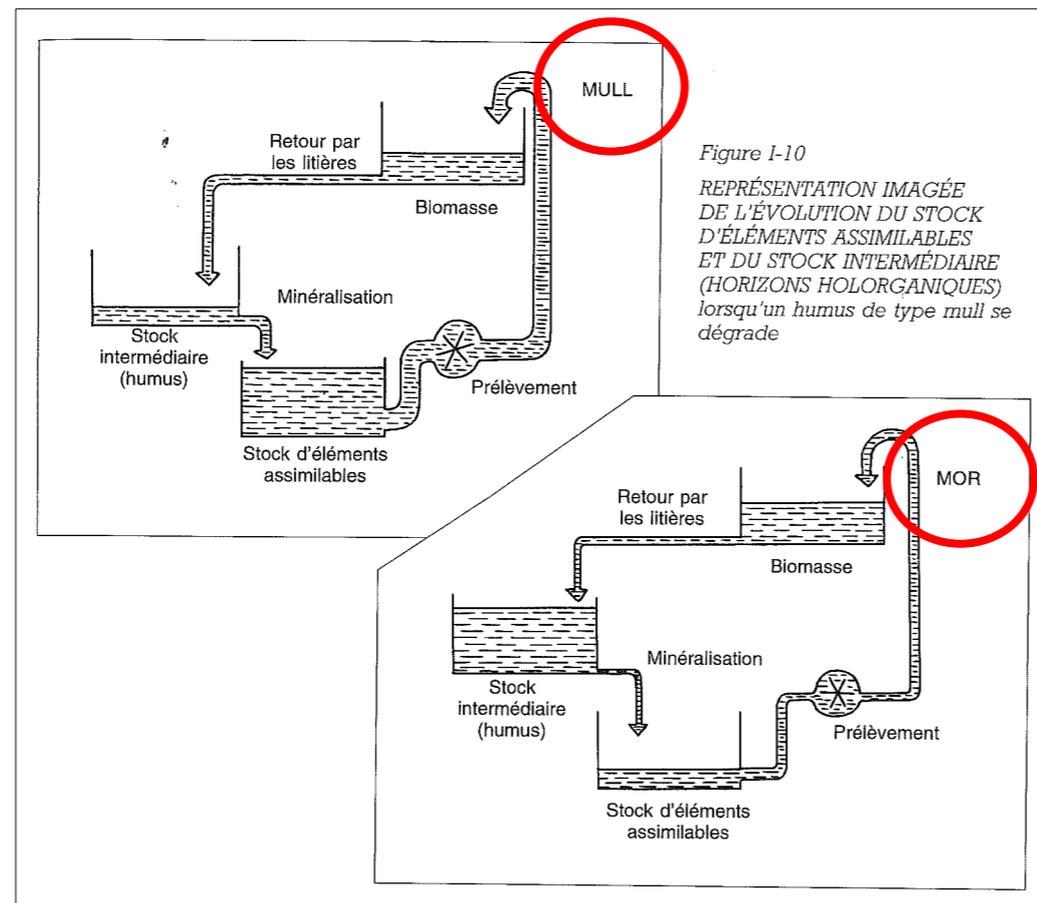


Quels Indicateurs ?

Formes d'humus et matière organique

Principe du diagnostic

- O et A
- échantillonnage visant à intégrer la variabilité spatiale et à limiter l'impact de la variabilité temporelle



Source : Bonneau, 1995

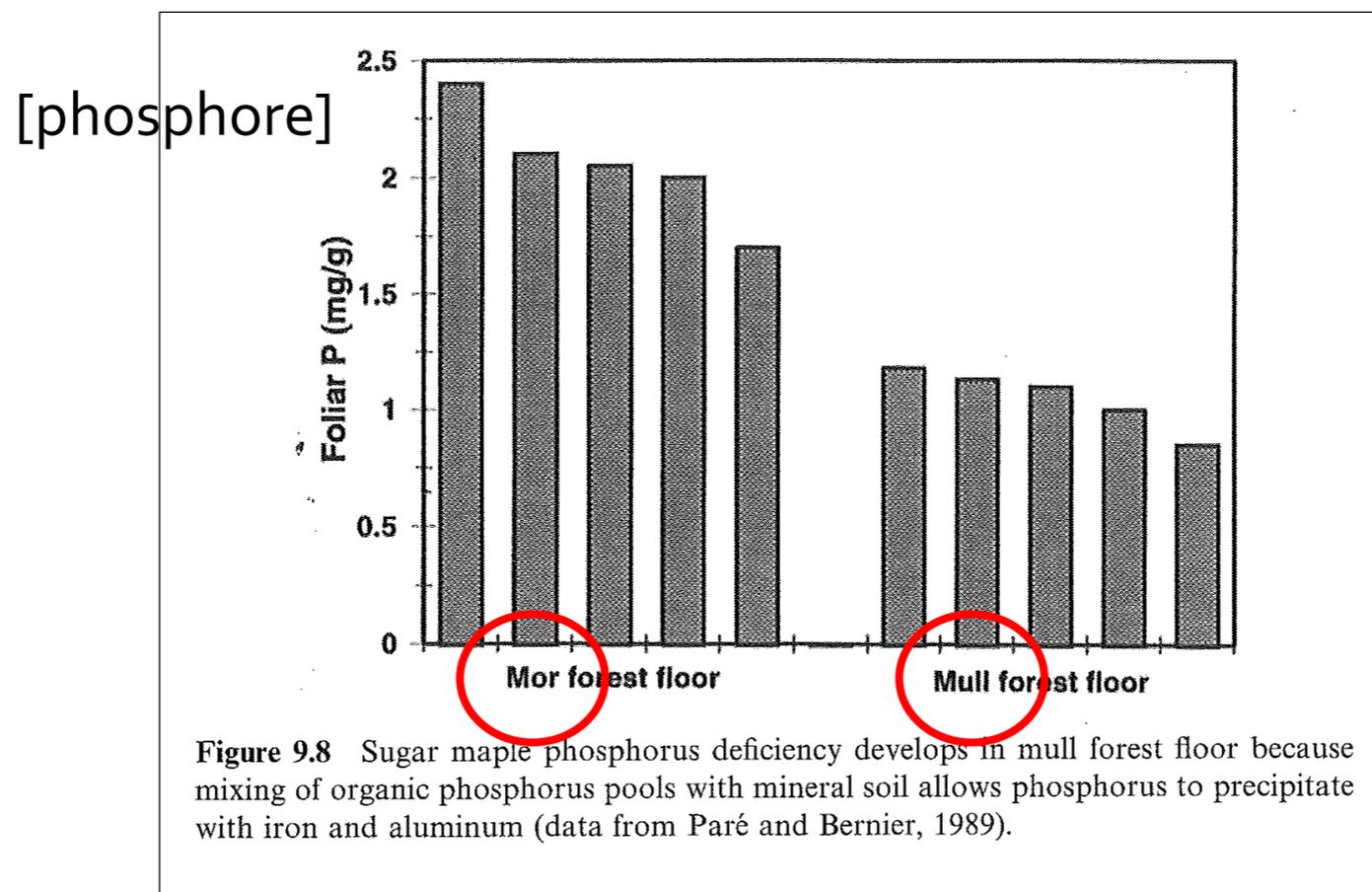


Quels Indicateurs ?

Formes d'humus et matière organique

Bio-indication (hypothèses, intérêts, limites)

- activité biologique 'actuelle' (type d'organismes, activités)
- décomposition / minéralisation ?
dynamique de la MO = $f(\dots)$ – eg : mulls calciques
- dynamique de la MO à considérer pas seulement sur O et A
- **cause** ou **conséquence** de la fertilité intrinsèque ?



Quels Indicateurs ?

Teneurs foliaires en éléments

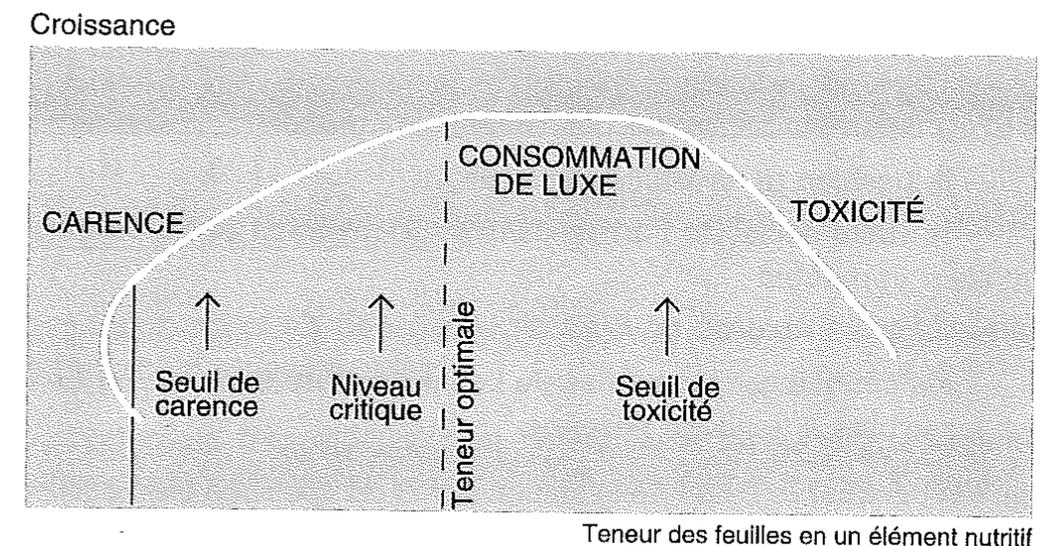
Hypothèse

- teneurs foliaires = reflet du statut nutritionnel général de l'arbre

Principes

- **teneurs absolues** et **rappports**
- confrontation à des seuils
carence, optimum, toxicité
critique : médiane carence-optimum

Figure VI-1
RELATION GÉNÉRALE
ENTRE CONCENTRATION
D'UN ÉLÉMENT NUTRITIF
DANS LES FEUILLES
ET CROISSANCE
D'UN VÉGÉTAL
(d'après PRÉVOT et
OLLAGNIER, 1956)



Source : Bonneau, 1995

Limites

- sources de variation nombreuses, à contrôler par un échantillonnage *ad hoc*
- difficulté de définir des seuils génériques
- interprétation dépendante de l'espèce



Quels Indicateurs ?

Productivité : indice de fertilité (IF)

Définition

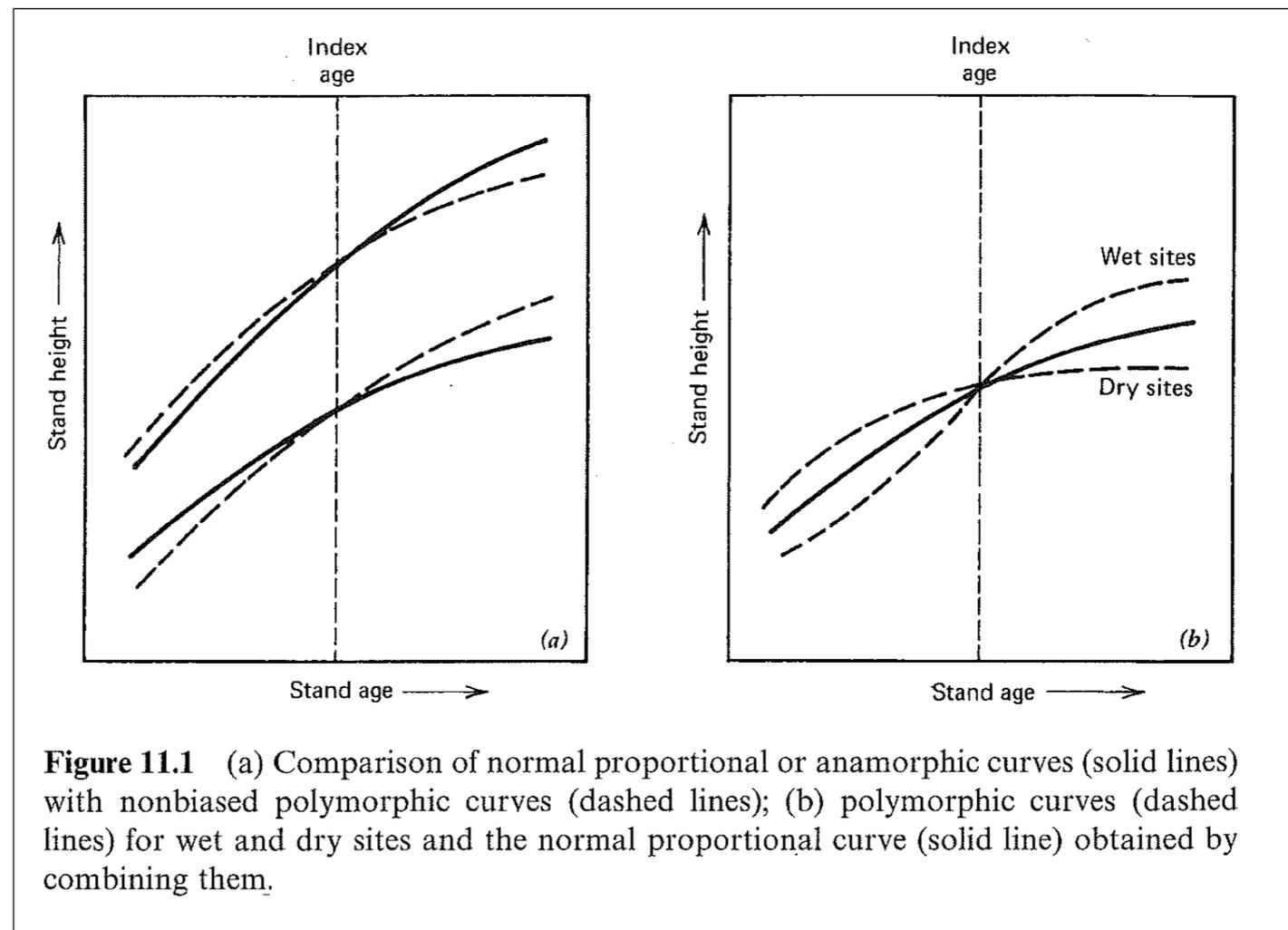
Hauteur dominante (100 + gros arbres à l'ha) à un âge de référence fixé

Hypothèses

$H_{dom} = f(\hat{\text{âge}}, \text{SITE}) \rightarrow H_{dom} = f(\hat{\text{âge}}, \text{site})$ à espèce fixée

$\text{PTV} = F_{\text{site}}(\hat{\text{âge}})$

$\text{PTV} = G(H_{dom})$



Source : Fisher et Binkley, 2000



Quels Indicateurs ?

Productivité : indice de fertilité (IF)

Intérêts, limites

- simplicité de mise en œuvre
- lien possible mais non univoque avec facteurs du milieu
 - effet génotype vs facteurs du milieu
 - IF identique pour différentes combinaisons possibles de facteurs du milieu
- limité aux peuplements équiennes
- invariance du niveau de fertilité dans le temps remise en cause

'date-invariant' à âge et site fixés
(pas d'influence 'externe')

'âge-invariant', à site fixé
(pas possible de croiser
différents niveaux de fertilité)

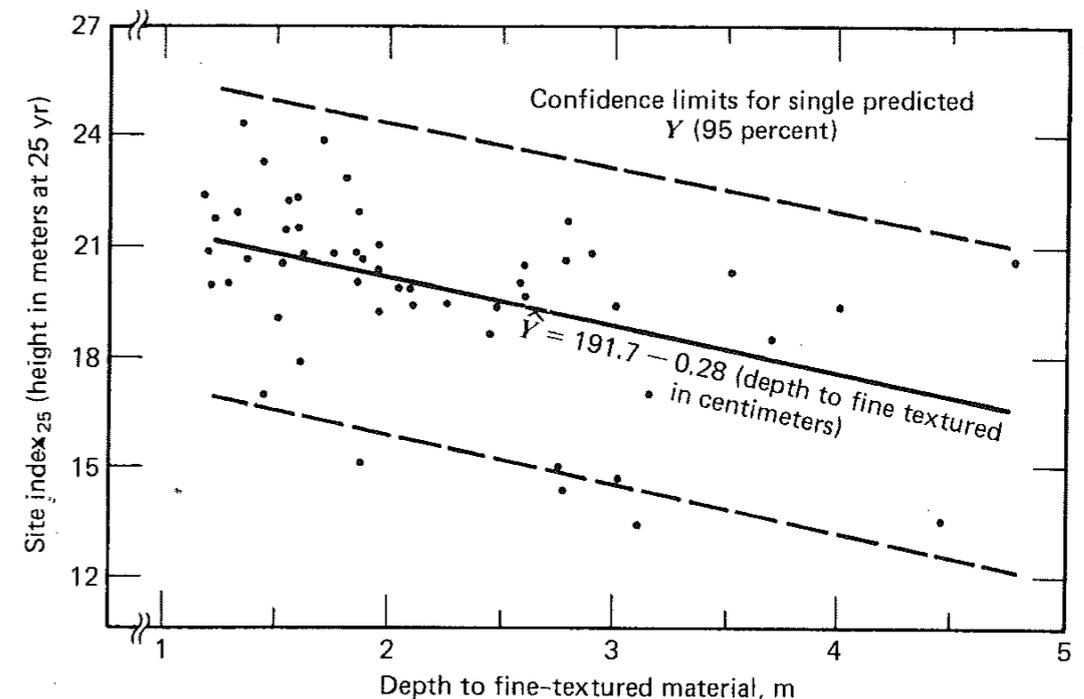


Figure 11.6 Regression of the site index for slash pine on the depth to fine-textured material in sand hills of west Florida (Hebb and Burns, 1975). Used with permission.

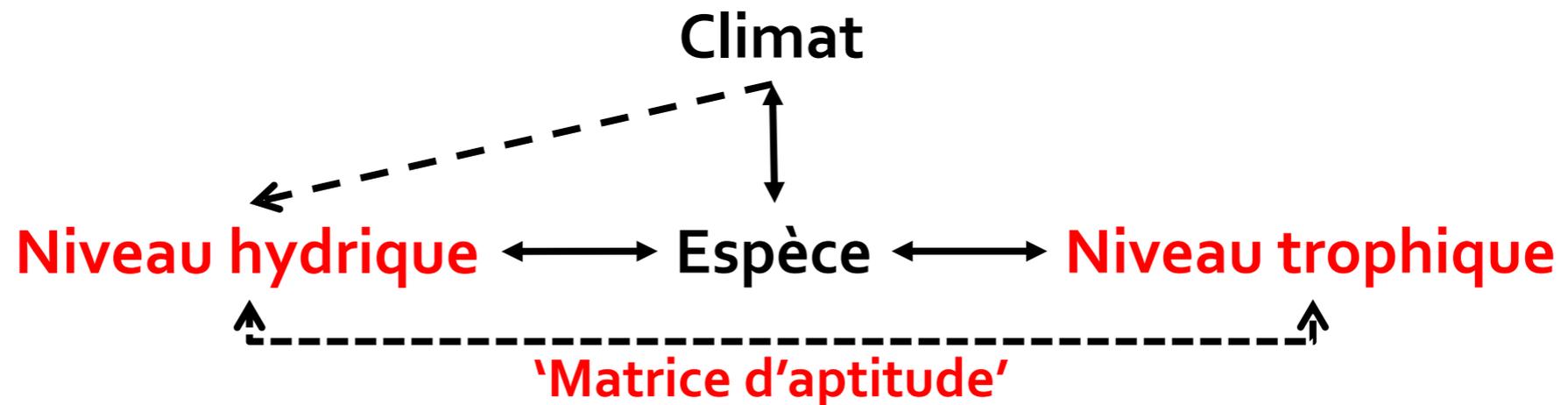
Source : Fisher et Binkley, 2000



Quelles combinaisons d'indicateurs ?

Exemple 1 : guide de boisement (1994, révision en cours)

Principe



boisement
essences

feuillues (15) & résineuses (14),
indigènes ou exotiques ;
production | accompagnement,
selon 1 essence = 1 fonction ;
liste d'essences compatibles dans une station

— GRILLE DE CHOIX DES ESSENCES FEUILLUES OPTIMALES —

SECTEUR 20 : ARDENNE ATLANTIQUE ET BASSINS ARDENNAIS

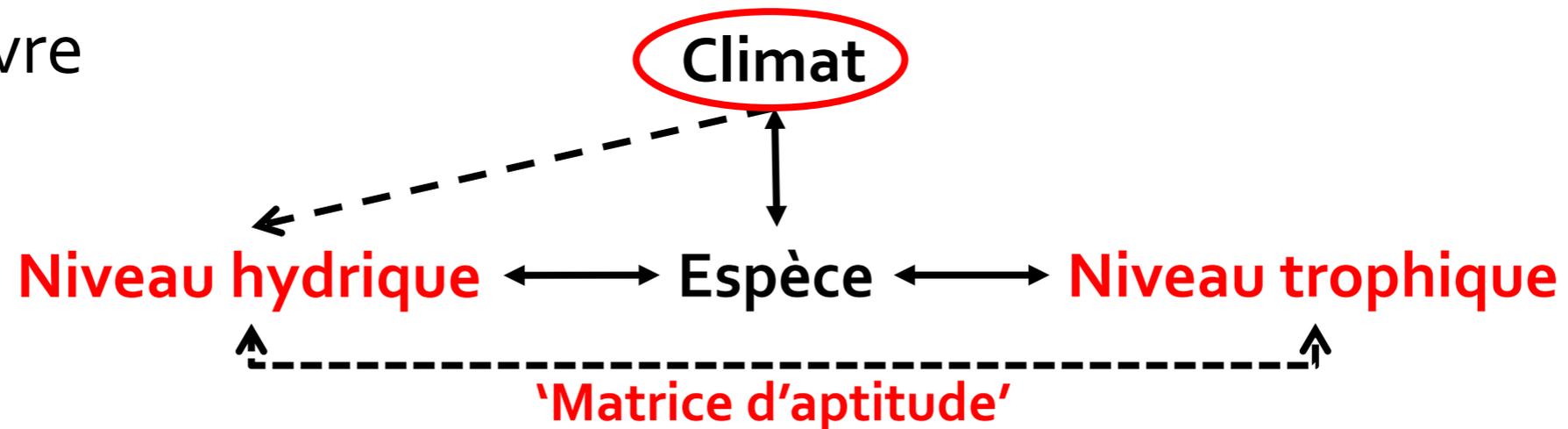
		TROP. HYDR.						
		-2	-1	0	1	2	3	
humide	-4	(sols carbonatés)	AX	AX	AX			
	-4 RHA		AX	AX	AX			
	-3		AX CP	AX CP	AX			
	-3 RHA		AX	AX	AX			
	-2		AX CP FE	BV CS FE	AX CP FE	AX BV CS FE	BV	BV
	-2 RHA		AX FE	BV CS FE	AX BV CS FE	AX BV CS FE	BV	BV
	-1		AX CP HE FE	BV CR CS FE	AX CP CR CS FE	AX BV CR CS FE	HE	BV
	-1 RHA		AX HE FE	BV CR CS FE	AX BV CR CS FE	AX BV CR CS FE	HE	BV
			HE FE	BV CR CS FE	BV CR CS FE	BV CR CS FE	HE	BV
	1		HE FE	BV CR CS FE	BV CR CS FE	BV CR CS FE	HE	BV
	2		HE FE	BV CR CS FE	BV CR CS FE	BV CR CS FE	HE	BV
	3		HE FE	BV CR CS FE	BV CR CS FE	BV CR CS FE	HE	BV
sec	4		BV	BV	BV	BV	BV	
	5							
	6							
		carbonaté			acide			



Quelles combinaisons d'indicateurs ?

Exemple 1 : guide de boisement

Mise en oeuvre



Climat : zones écologiques --> zones bio-climatiques

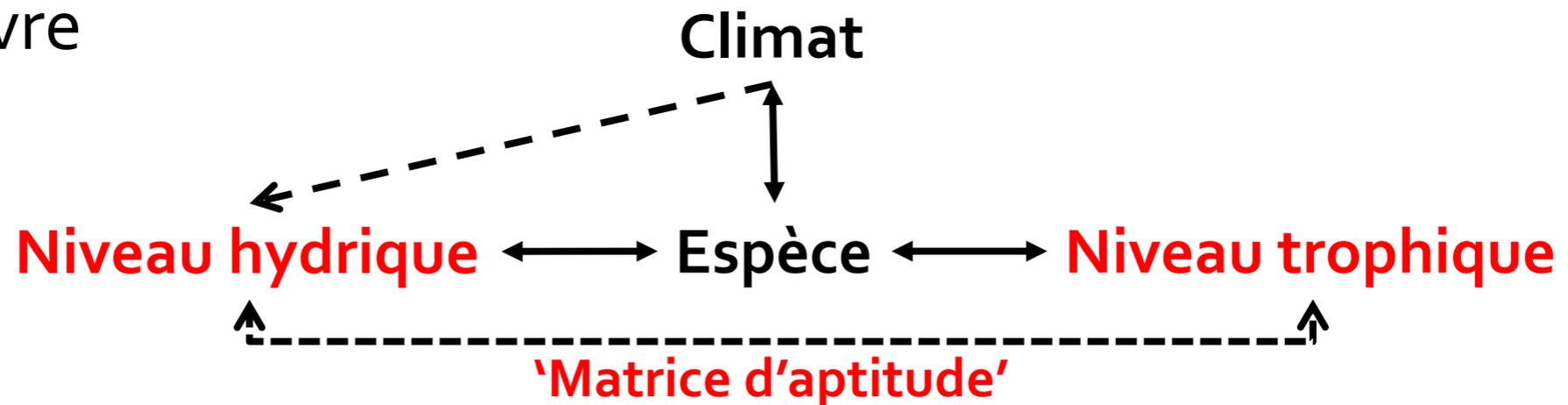
	Domaine	Secteur sous-secteur	District	Station
Facteur(s) du milieu	- Rayonnement énergétique - Disponibilité en eau (ETP)	- Géomorphologie - Litho-pédologie - Climat	Litho-chimie	Types de sols (IRSIA, 1 : 20 000)
Niveaux (nb, [dénomination])	- Atlantique (DA) - Médio-européen (DM)	- DA : 8 - DM : 19 (20) - Sous-secteurs : 3 (principal, chaud, froid)		



Quelles combinaisons d'indicateurs ?

Exemple 1 : guide de boisement

Mise en oeuvre



Niveaux hydrique et trophique : carte numérique des sols de Wallonie (1 : 20 000, sur base de levés au 1 : 5 000)

Séries dérivées	Série principale (complexe)			Phases Variantes	
<i>Substrat <125 cm</i> - G : nature du substrat précisée si ? de celle de la charge - Autres : nature du substrat précisée	RM Texture	Drainage	Profil	Charge (EG >5%) - S, U (L, A, E) : Udb <u>k</u> - L, A, E ? G 5 < EG < 15% : Gbb EG > 15% : Gbb <u>f</u>	① Phases – <i>profondeur</i> - <u>Nature</u> SubstratProfondeur [†] : Z, S, P, L, A, E, U : <u>f</u> Abb2 G (5 < EG < 15%) : <u>f</u> Gbb2 G (>15%) [†] : <u>f</u> Gbb <u>r</u> 5 ou Gbb <u>f</u> 5 – autres (p.i.) ② Variantes – <i>matériau parental meuble, développement de profil, charge</i>

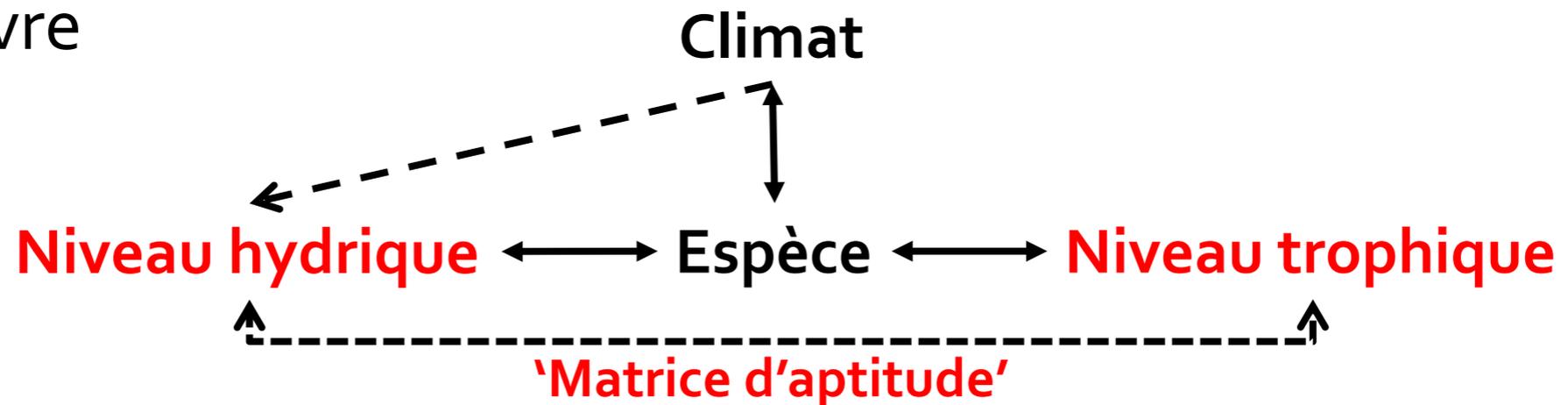
[#]RM : roche-mère ; [†](i) toutes textures sauf G >15% : chiffre = profondeur d'apparition du substrat, (ii) G >15% : chiffre = profondeur d'apparition du substrat × charge ; [†]substrat indiqué si nature différente de celle de la charge



Quelles combinaisons d'indicateurs ?

Exemple 1 : guide de boisement

Mise en oeuvre



Niveau hydrique : clé hydrique (15 niveaux dont 4 RHA)

Paramètre	Source [#]	Interprétation écologique
Classe de drainage	CS, S	Infiltration, aération anoxie
Texture	CS, S	Réserve en eau utile (capacité au champ [$?_{CC}$], point de flétrissement permanent [$?_{PFP}$]), infiltration, aération anoxie
Profondeur pierrosité	CS, S	Volume de sol prospectable (selon pierrosité), diminution corrélative (sauf roches poreuses) de la réserve en eau (réduction du volume de terre fine), altération du drainage
Exposition	CT	Évapotranspiration potentielle (ETP, sous-secteurs)
Zone d'apport	CT	Apport latéral d'eau

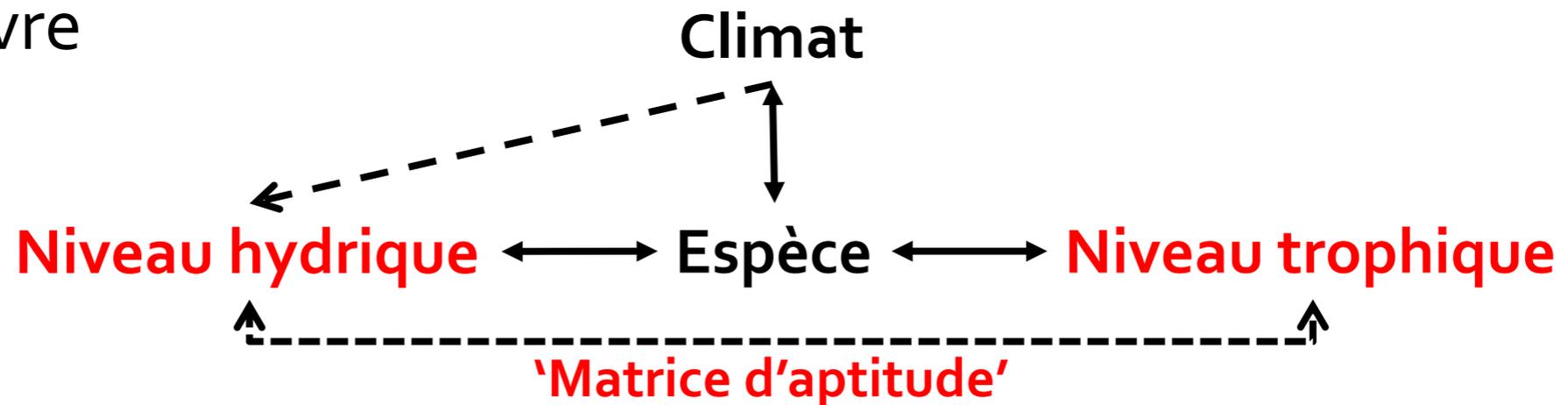
[#]CS : carte des sols (IRSIA — 1 : 20 000), CT : carte topographique (IGN), S : sondage de vérification



Quelles combinaisons d'indicateurs ?

Exemple 1 : guide de boisement

Mise en oeuvre



Niveau trophique : clé trophique (6 niveaux)

Paramètre	Source [#]
Nature du <i>substrat</i>	CS, S, CG
Nature de la <i>charge</i>	CS, S
(Développement de) profil	CS, S pH
pH (H ₂ O)	Mesure pH

[#]CS : carte des sols (IRSIA — 1 : 20 000), CG : carte géologique (1 : 25 000), S : sondage de vérification, pH : pH(H₂O) mesuré dans l'horizon hémi-organique ou dans la couche de sol 0–20 cm après enlèvement des couches holorganiques



Quelles combinaisons d'indicateurs ?

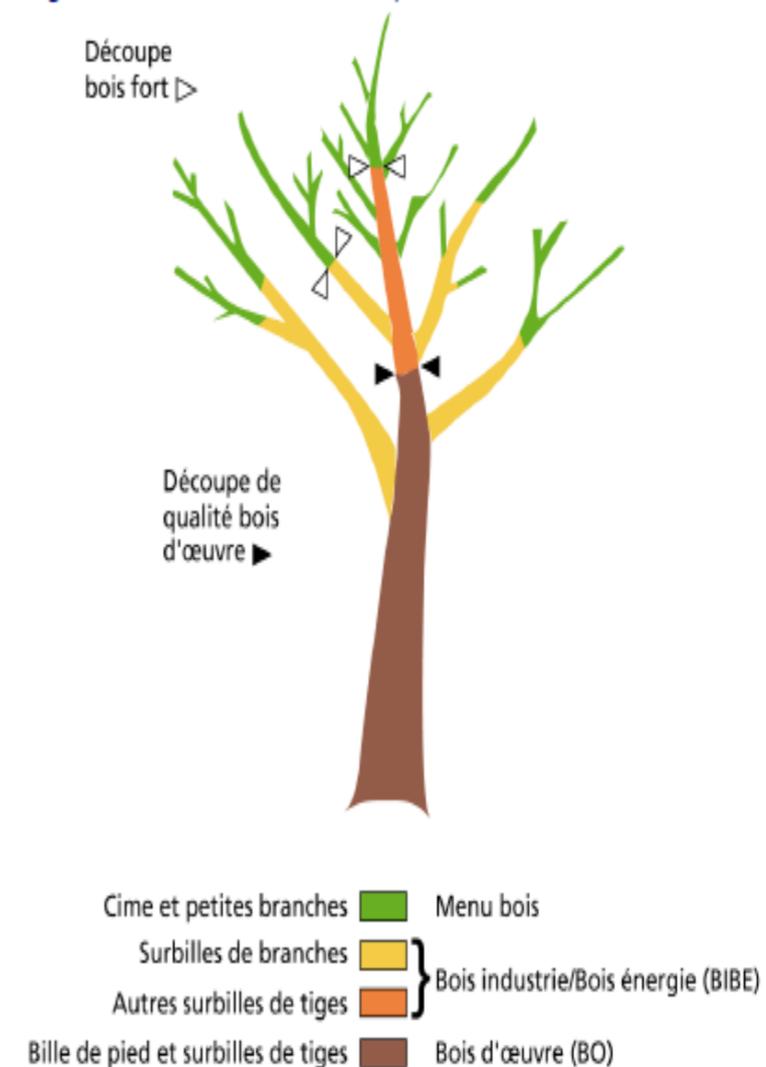
Exemple 2 : évaluation des risques d'exportations minérales

Contexte

impacts de la récolte accrue de biomasse sur :

- les sols (fertilité , chimique en particulier)
- la biodiversité

Figure 4 : Localisation des compartiments de biomasse dans l'arbre



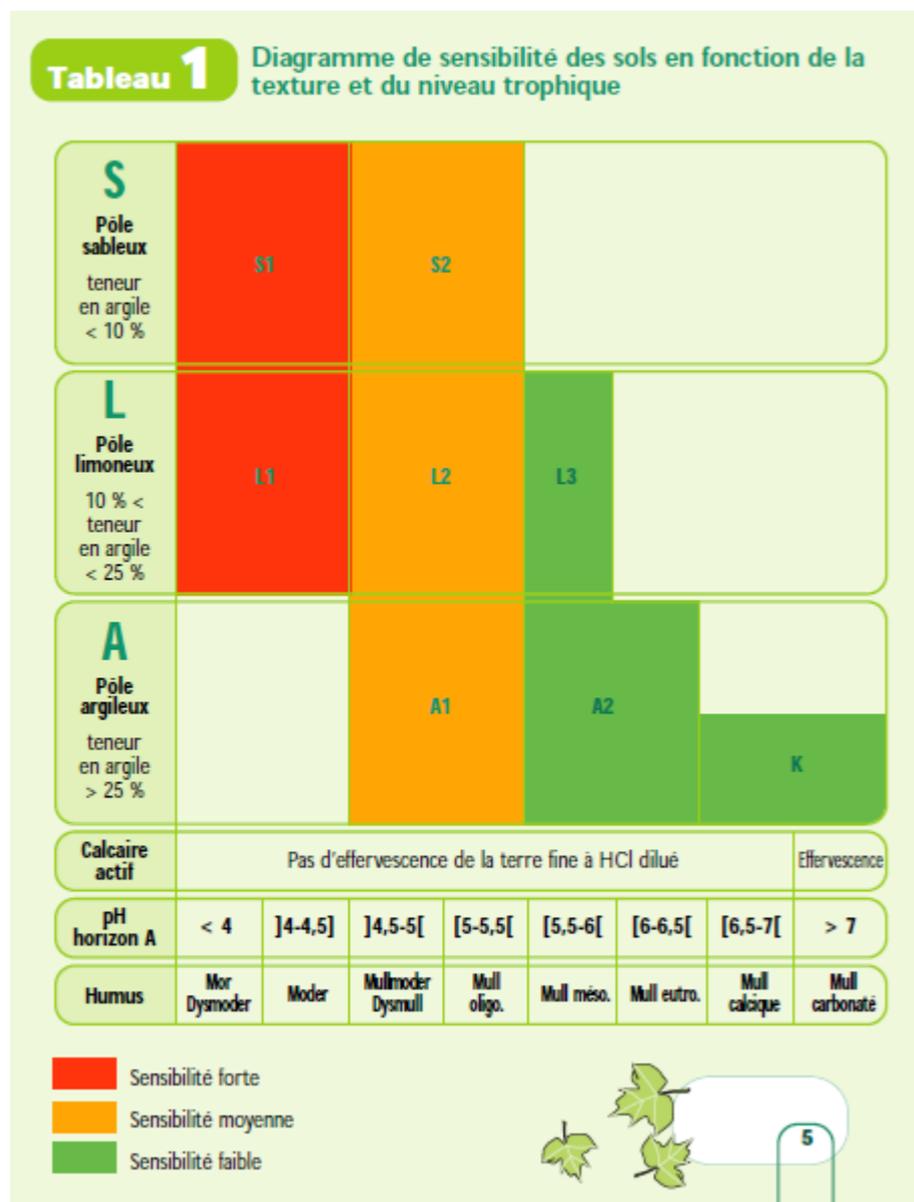
Quelles combinaisons d'indicateurs ?

Exemple 2 : évaluation des risques d'exportations minérales

Principes

Sensibilité des sols ←————→ Estimation des exportations

- équations allométriques
- modèles de croissance
- scénarios (sylviculture, exploitation)



Source : Cacot (coord.), 2006

pools (S, L, A)
×
humus | pH → trois niveaux de sensibilité



Conclusions : qualités attendues des indicateurs ?

Influences sur la sélection et la combinaison des variables

adapté à l'objectif recherché

robuste vis-à-vis des échelles spatiales et temporelles considérées
discriminant : sensible aux variations des facteurs, aux échelles retenues
répétable et précis (bruit < signal recherché)

capable de séparer entre facteurs 'intrinsèques' et 'extrinsèques' de la
fertilité, notamment ceux liés à la gestion

basé sur des sources de données disponibles et fiables

parcimonieux : optimisation du ratio coût acquisition/information fournie
synthétique/intégratif

interprétable en termes fonctionnels

documenté (référentiel d'interprétation)

'longévif'



Conclusions : qualités attendues des indicateurs ?

Influences sur la sélection et la combinaison des variables

adapté à l'objectif recherché

robuste vis-à-vis des échelles spatiales et temporelles considérées

discriminant : sensible aux variations des facteurs, aux échelles retenues

répétable et précis (bruit < signal recherché)

capable de séparer entre facteurs 'intrinsèques' et 'extrinsèques' de la fertilité, notamment ceux liés à la gestion

basé sur des sources de données disponibles et fiables

parcimonieux : optimisation du ratio coût acquisition/information fournie synthétique/intégratif

interprétable en termes fonctionnels

documenté (référentiel d'interprétation)

'longévif'



Conclusions : qualités attendues des indicateurs ?

Influences sur la sélection et la combinaison des variables

adapté à l'objectif recherché

robuste vis-à-vis des échelles spatiales et temporelles considérées

discriminant : sensible aux variations des facteurs, aux échelles retenues

répétable et précis (bruit < signal recherché)

capable de séparer entre facteurs 'intrinsèques' et 'extrinsèques' de la fertilité, notamment ceux liés à la gestion

basé sur des sources de données disponibles et fiables

parcimonieux : optimisation du ratio coût acquisition/information fournie synthétique/intégratif

interprétable en termes fonctionnels

documenté (référentiel d'interprétation)

'longévif'



Conclusions : qualités attendues des indicateurs ?

Influences sur la sélection et la combinaison des variables

adapté à l'objectif recherché

robuste vis-à-vis des échelles spatiales et temporelles considérées

discriminant : sensible aux variations des facteurs, aux échelles retenues

répérable et **précis** (bruit < signal recherché)

capable de séparer entre facteurs 'intrinsèques' et 'extrinsèques' de la fertilité, notamment ceux liés à la gestion

basé sur des sources de données disponibles et fiables

parcimonieux : optimisation du ratio coût acquisition/information fournie synthétique/intégratif

interprétable en termes fonctionnels

documenté (référentiel d'interprétation)

'longévif'



Conclusions : qualités attendues des indicateurs ?

Influences sur la sélection et la combinaison des variables

adapté à l'objectif recherché

robuste vis-à-vis des échelles spatiales et temporelles considérées

discriminant : sensible aux variations des facteurs, aux échelles retenues

répétable et **précis** (bruit < signal recherché)

capable de **séparer entre facteurs 'intrinsèques' et 'extrinsèques' de la fertilité**, notamment ceux liés à la gestion

basé sur des sources de données disponibles et fiables

parcimonieux : optimisation du ratio coût acquisition/information fournie
synthétique/intégratif

interprétable en termes fonctionnels

documenté (référentiel d'interprétation)

'longévif'



Conclusions : qualités attendues des indicateurs ?

Influences sur la sélection et la combinaison des variables

adapté à l'objectif recherché

robuste vis-à-vis des échelles spatiales et temporelles considérées

discriminant : sensible aux variations des facteurs, aux échelles retenues

répétable et **précis** (bruit < signal recherché)

capable de **séparer entre facteurs 'intrinsèques' et 'extrinsèques' de la fertilité**, notamment ceux liés à la gestion

basé sur des sources de **données disponibles** et **fiables**

parcimonieux : optimisation du ratio coût acquisition/information fournie
synthétique/intégratif

interprétable en termes fonctionnels

documenté (référentiel d'interprétation)

'longévif'



Conclusions : qualités attendues des indicateurs ?

Influences sur la sélection et la combinaison des variables

adapté à l'objectif recherché

robuste vis-à-vis des échelles spatiales et temporelles considérées

discriminant : sensible aux variations des facteurs, aux échelles retenues

répétable et **précis** (bruit < signal recherché)

capable de **séparer entre facteurs 'intrinsèques' et 'extrinsèques' de la fertilité**, notamment ceux liés à la gestion

basé sur des sources de **données disponibles** et **fiables**

parcimonieux : optimisation du ratio coût acquisition/information fournie synthétique/intégratif

interprétable en termes fonctionnels

documenté (référentiel d'interprétation)

'longévif'



Conclusions : qualités attendues des indicateurs ?

Influences sur la sélection et la combinaison des variables

adapté à l'objectif recherché

robuste vis-à-vis des échelles spatiales et temporelles considérées

discriminant : sensible aux variations des facteurs, aux échelles retenues

répétable et **précis** (bruit < signal recherché)

capable de **séparer entre facteurs 'intrinsèques' et 'extrinsèques' de la fertilité**, notamment ceux liés à la gestion

basé sur des sources de **données disponibles** et **fiables**

parcimonieux : optimisation du ratio coût acquisition/information fournie
synthétique/intégratif

interprétable en termes fonctionnels

documenté (référentiel d'interprétation)

'longévif'



Conclusions : qualités attendues des indicateurs ?

Influences sur la sélection et la combinaison des variables

adapté à l'objectif recherché

robuste vis-à-vis des échelles spatiales et temporelles considérées

discriminant : sensible aux variations des facteurs, aux échelles retenues

répétable et **précis** (bruit < signal recherché)

capable de **séparer entre facteurs 'intrinsèques' et 'extrinsèques' de la fertilité**, notamment ceux liés à la gestion

basé sur des sources de **données disponibles** et **fiables**

parcimonieux : optimisation du ratio coût acquisition/information fournie
synthétique/intégratif

interprétable en termes fonctionnels

documenté (référentiel d'interprétation)

'longévif'



Conclusions : qualités attendues des indicateurs ?

Influences sur la sélection et la combinaison des variables

adapté à l'objectif recherché

robuste vis-à-vis des échelles spatiales et temporelles considérées

discriminant : sensible aux variations des facteurs, aux échelles retenues

répétable et **précis** (bruit < signal recherché)

capable de **séparer entre facteurs 'intrinsèques' et 'extrinsèques' de la fertilité**, notamment ceux liés à la gestion

basé sur des sources de **données disponibles** et **fiables**

parcimonieux : optimisation du ratio coût acquisition/information fournie
synthétique/intégratif

interprétable en termes fonctionnels

documenté (référentiel d'interprétation)

'longévif'



Conclusions : qualités attendues des indicateurs ?

Influences sur la sélection et la combinaison des variables

adapté à l'objectif recherché

robuste vis-à-vis des échelles spatiales et temporelles considérées

discriminant : sensible aux variations des facteurs, aux échelles retenues

répérable et **précis** (bruit < signal recherché)

capable de **séparer entre facteurs 'intrinsèques' et 'extrinsèques' de la fertilité**, notamment ceux liés à la gestion

basé sur des sources de **données disponibles** et **fiables**

parcimonieux : optimisation du ratio coût acquisition/information fournie
synthétique/intégratif

interprétable en termes fonctionnels

documenté (référentiel d'interprétation)

'longévif'

