

**Le cycle biogéochimique dans les écosystèmes forestiers tempérés et tropicaux : effet des essences, de leur stade de développement et des traitements, à différentes échelles.**

**Approche analytique et modélisation**

**J. RANGER, E.DAMBRINE, F.GERARD, C. NYS, M.PTURPAULT, B. ZELLER (1)  
J.P. LACLAU<sup>(23)</sup>, P. DELEPORTE, J.D. NZILA<sup>(22)</sup>, L. SAINT-ANDRE <sup>(21)</sup> (2)  
J.M. OTTORINI (3) ; Tous les Chercheurs et Techniciens des projets pluridisciplinaires,  
Biologistes en particulier .....et de très nombreux postDoctorants et étudiants.**

(1) INRA BEF 54280 Champenoux ; (2) CIRAD 34398 Montpellier <sup>(21)</sup> -UR2PI BP 1291 Pointe -  
Noire -Congo <sup>(22)</sup> – ESALQ-USP Piracicaba Brésil <sup>(23)</sup> ; (3) LERFOB 54280 Champenoux

avec la collaboration technique de S. BIENAIME, P. BONNAUD, S. DIDIER, D. GELHAYE, L. GELHAYE, G. NOURRISSON, J.C. MAZOMBOU, B. POLLIER

## Concepts

- Approche quantitative directe du système complexe
- Association avec des méthodes plus réductionnistes
- Échelles complémentaires allant du site fonctionnel à la parcelle forestière, et au bassin versant (qualité des eaux de surface)
- Suivi sur le moyen voire le long terme
- Développement de la modélisation
- Approche pluridisciplinaire
- Utilisation des réseaux d'observation
- Transfert vers le Développement

## Intérêts de la méthode

- l'approche pluridisciplinaire *in situ* permet de connecter physique-chimie-biologie en respectant les flux naturels
  - elle autorise des manipulations d'écosystème
  - Elle conduit au calcul de bilans d'éléments
  - Elle permet le développement de simulateurs réalistes intéressant directement l'application
- 
- les sites-ateliers expérimentaux sont des laboratoires d'écologie *in situ*

## Limites de la méthode

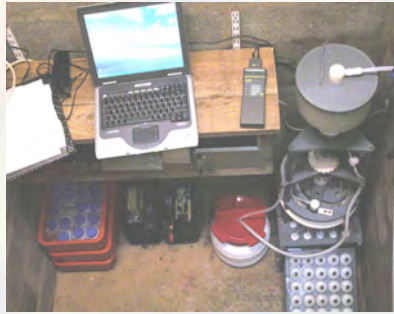
- Nécessité d'observer à la bonne résolution spatio-temporelle pour identifier les mécanismes (instantané) et pour calculer les bilans (intégration).
- Amélioration indispensable de l'instrumentation
- Généralisation des données : nécessité de développer des modèles pour explorer la variabilité
- Spatialisation : le bassin versant est une bonne échelle intégratrice pour étudier l'effet du milieu et de l'occupation des sols sur les eaux de surface (qualité en particulier).

Site	Localisation	Essence	Objectif	N <sup>b</sup> placette	Responsable
Moulières	86	pin Laricio	fertilisation	2	Ranger
Ardennes	08	épicéa , feuillus mixtes	effet des essences	2	Nys
Aubure	67	épicéa, hêtre	dépérissement	4	Dambrine
Le Bonhomme	88	épicéa	dépérissement	3	Ranger
Gemaingoutte	88	épicéa	dépérissement	1	Ranger
Vauxrenard	69	Douglas	durabilité	3	Ranger
Fougères	22	hêtre	durabilité	5	Nys
Breuil	58	Douglas, épicéa, hêtre, chêne, pin Laricio, sapin de Nordmann	effet des essences	9	Ranger
<i>total</i>				29	
Kondi	Congo Afrique	eucalyptus	durabilité	2	Laclau, Deleporte
Itatinga	SP- Brésil	eucalyptus	durabilité	5	Laclau
Libo	Sumatra Indonésie	palmier à huile	nutrition	1	Caliman
<i>total</i>				8	

Historique des sites étudiés pour les cycles biogéochimiques

## Activité des sites-ateliers cycles.....

	Climat local [au minimum pluie ; température] Pédoclimat [humidité ; température]
<b>S T O C K</b>	Sols Végétation (arbres ; végétation spontanée)
<b>M E C A N I S M E</b>	Biodégradation [coefficients Jenny ; sachets ; 15N (hêtre)] Minéralisation N [in situ ; in vitro (nette ; brute)] Altération [physique et biologique] Acquisition chimie des solutions [gravitaires ; liées] Structuration des populations [sol global ; litières ; rhizosphère]
<b>F L U X</b>	Apports atmosphériques [dépôts humides, dépôts secs ; interaction avec les couverts] Altération [minéralogie quantitative ; réactivité ; localisation ; flux modélisé] Exportations par les récoltes [C et éléments f(récoltes)] Drainage [modèle hydrique ; chimie des solutions] Prélèvements ; Transferts internes ; Immobilisation des peuplements Restitutions par les litières Décomposition
<b>M O D E L I S A T I O N</b>	A base mécaniste.... Flux hydrique Equilibre solide -solution Dynamique croissance – incorporation nutriments – transferts internes - exportations Décomposition Simulation opérationnelle.... Exportations minérale
	Calcul des bilans E/S à différentes échelles



*Les apports atmosphériques*



*Les solutions du sol*



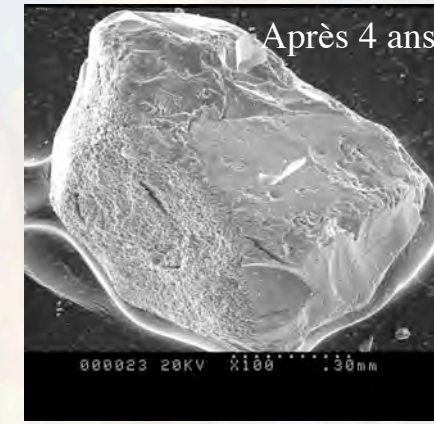
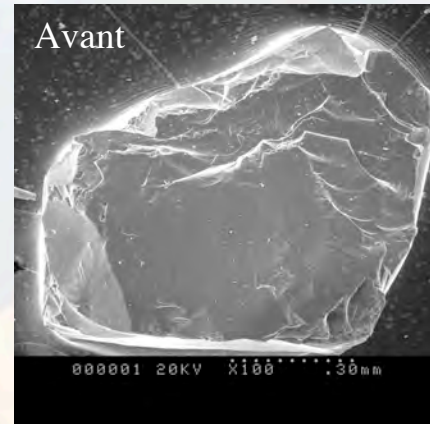
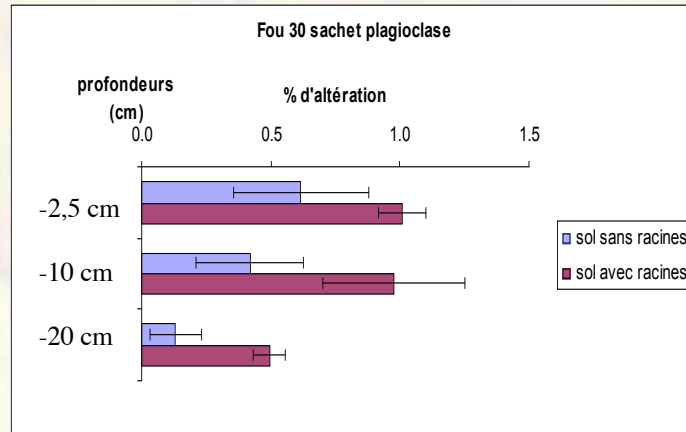
*Le pédoclimat*



# Les mécanismes



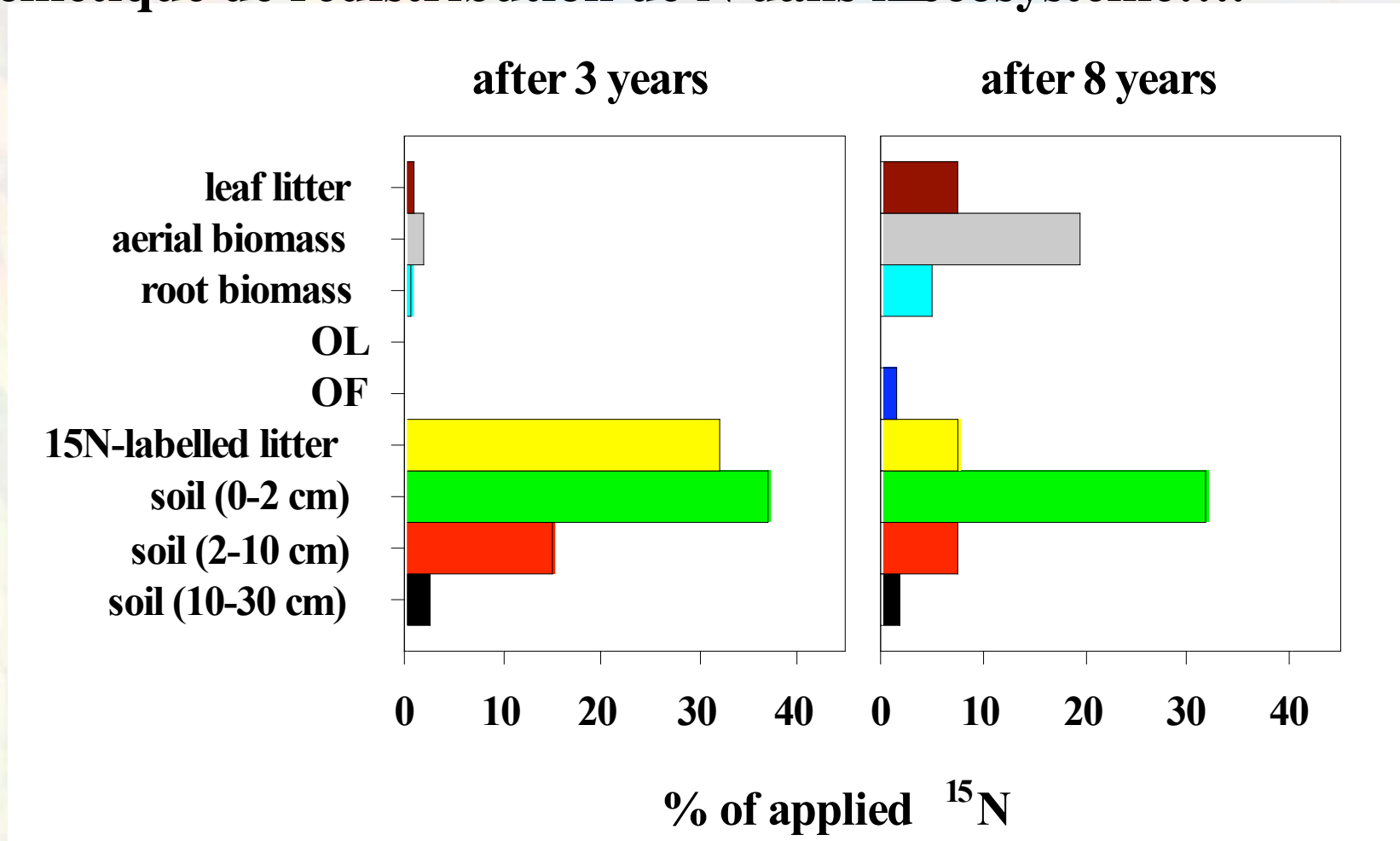
## Altération biologique : rôle de la rhizosphère.....



## Le flux d 'éléments issu de l 'altération des minéraux est faible e sol acide.....

	Flux Ca kg.ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup>	Minéraux Contenant Ca	Flux Mg kg.ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup>	Minéraux Contenant Mg	Flux K kg.ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup>	Minéraux contenant K
Aubure épicéa	0.3-0.8	Apatite albite	0.6-2	Smectite illite	6-13	Feldspath K illite
Aubure hêtre	0.1-0.2	Apatite albite	0.2-0.9	Smectite illite	3-5.5	Feldspath K illite
Beaujolais Douglas	0.9	Apatite (80%)* andésine dravite	1	Vermiculite (75%) illite	7.5	Feldspath K (70%) illite
Congo Eucalytus	0		0	Illite Dravite staurotide vermiculite	0.3	Illite

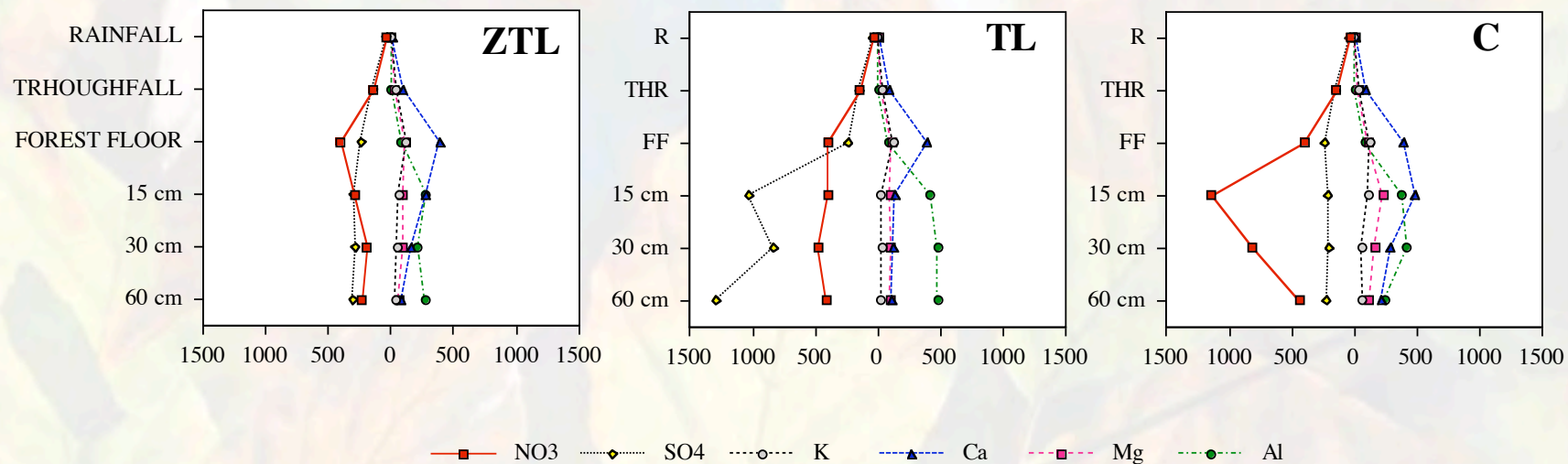
# Biodégradation : intérêt litières marquées pour quantifier la cinétique de redistribution de N dans l'écosystème....



Bilan <sup>15</sup>N Ebrach 1999 et 2004 (Zeller et al. 2005)

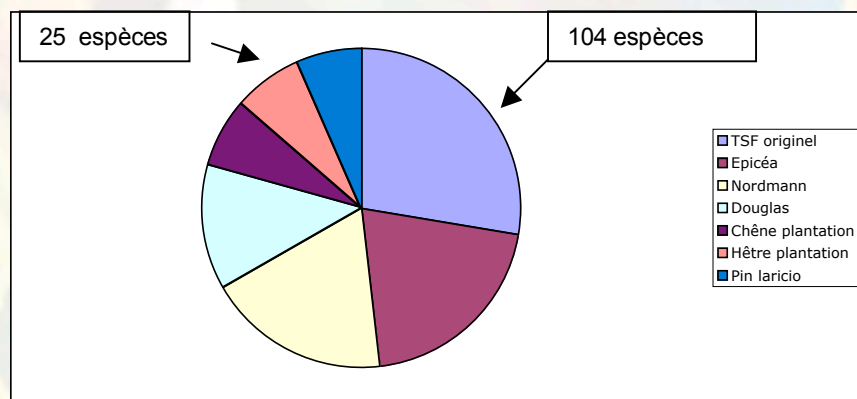


# L'acquisition de la composition chimique des solutions du sol .....

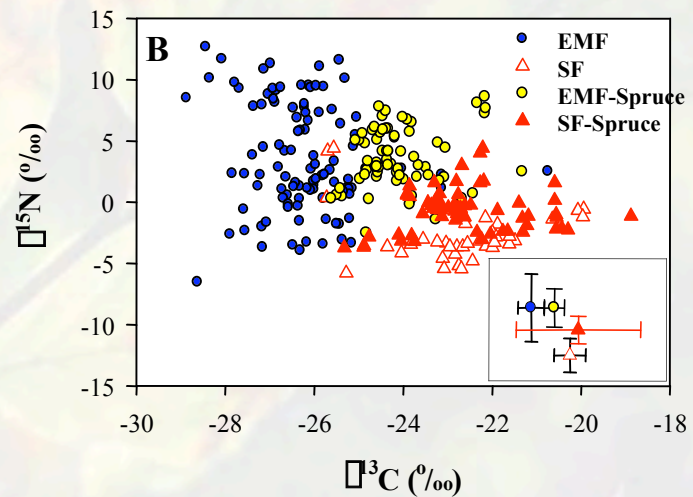
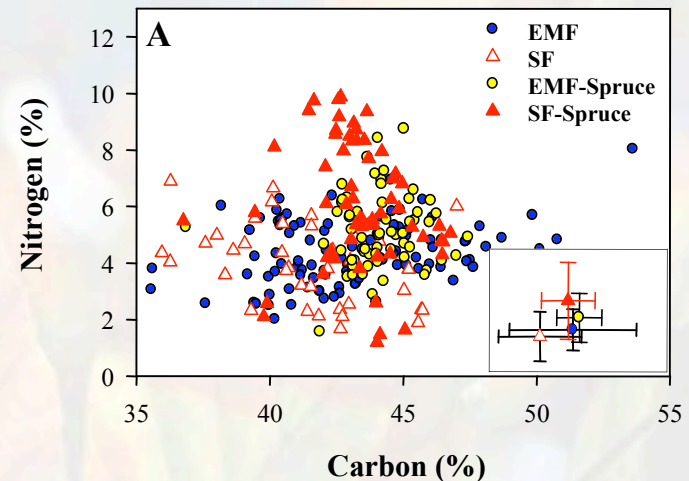


Solutions libres (ZTL), faiblement liées (TL) et fortement liées (C) collectées pendant 6 ans à Vauxrenard (Beaujolais) (Ranger et al. 2001)

## Essences et structuration de la flore fongique



Effet de l'essence sur le nombre d'espèces de champignons

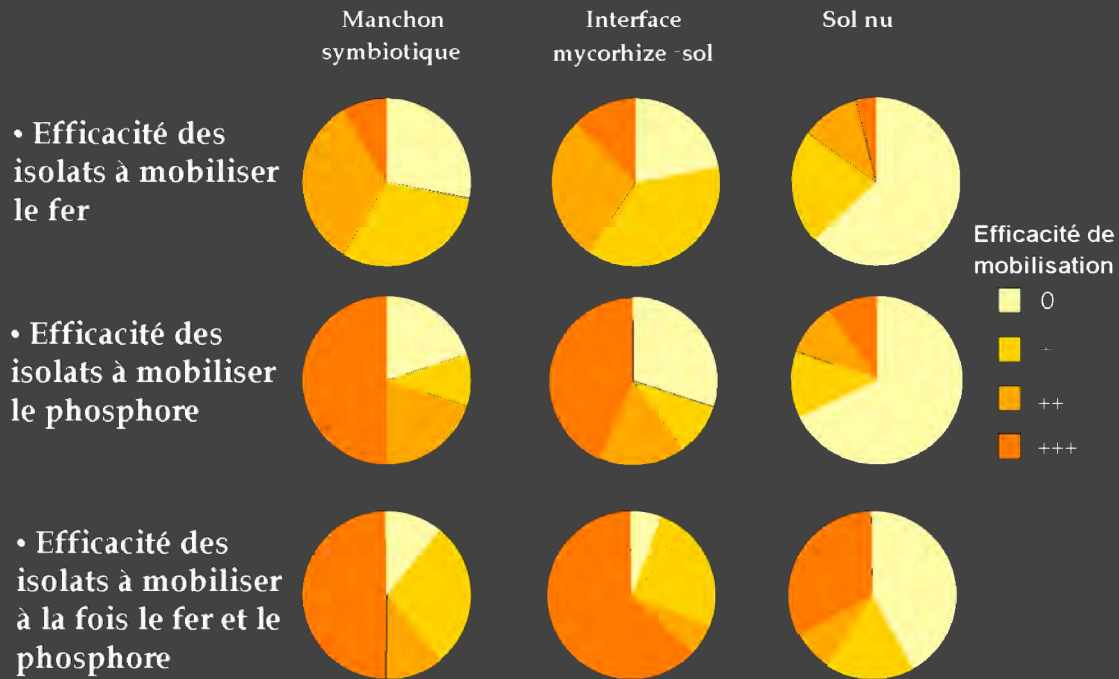


Discrimination des champignons saprophytes et mycorhiziens en fonction de la teneur en azote total et en carbone total des carpophores (A) et en fonction des  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  (B), sous feuillus et Epicéa. Le Tacon et al. 2005



## Structuration des populations bactériennes et activité dans la rhizosphère....

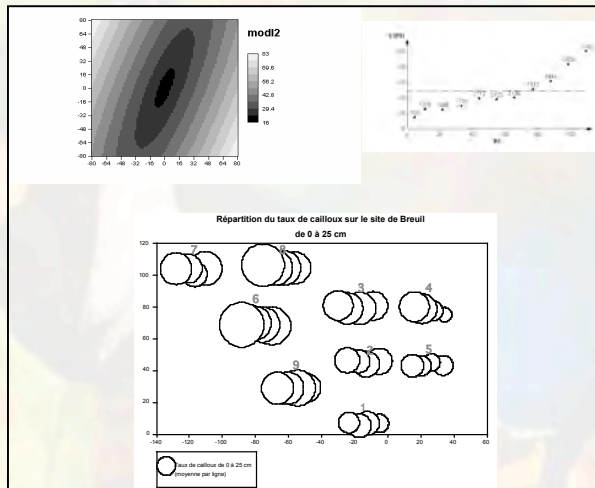
### ➤ Effet du compartiment d'origine (hor. minéral)



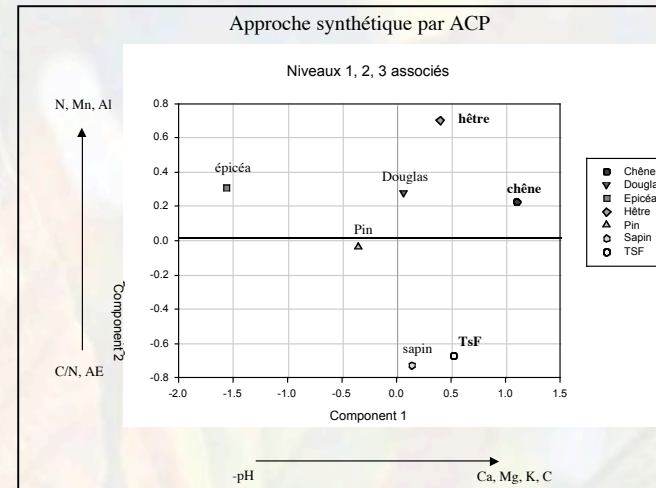
The background of the slide is a close-up photograph of autumn leaves. The leaves are in various stages of color change, showing shades of green, yellow, orange, and brown. The lighting is soft, creating a bokeh effect in the background. The text 'Stocks et flux.....' is centered over this image.

**Stocks et flux.....**

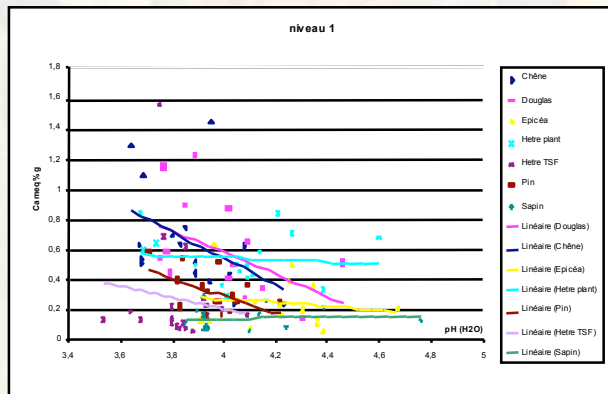
## Essences et évolution des sols solides.....



Variabilité spatiale de la granulométrie



ACP sur pH, C, N et éléments échangeables



Relation entre Ca ech et pH

	0-25 cm			25-70 cm		
	K	Mg	Ca	K	Mg	Ca
Chêne	171 c	23 b	56 c	236 b	8 a	9 ab
	16	20	45	21	58	103
Hêtre	116 ab	19 ab	45 bc	146 a	13 a	15 ab
	20	22	35	34	50	116
Douglas	126 ab	24 b	57 c	155 a	14 a	6 ab
	23	34	60	33	43	152
Epicéa	107 a	19 ab	32 abc	223 b	14 a	27 b
	13	19	57	34	30	89
Pin	113 ab	20 ab	38 bc	135 a	12 a	18 ab
	27	25	102	25	83	219
Sapin	117 ab	16 a	14 a	121 a	9 a	3 a
	19	18	41	18	22	86
TsF	130 b	24 b	23 ab	145 a	15 a	10 ab
	15	29	89	16	57	231

XXX = valeur moyenne, a = différent à 5% si lettre différente, xx : CV

Stocks de K, Mg et Ca échangeables en fonction des essences (données en  $kg \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ )

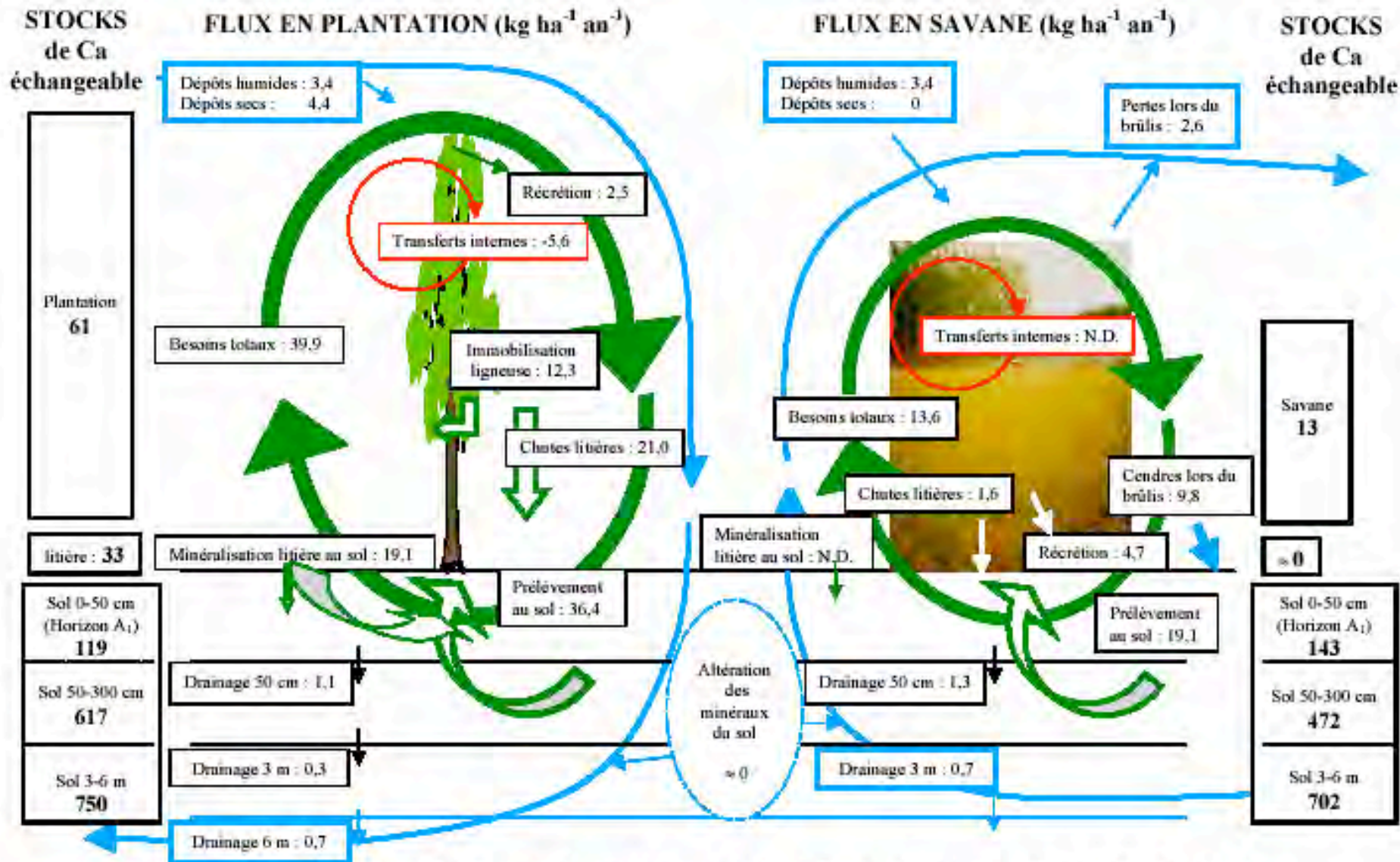


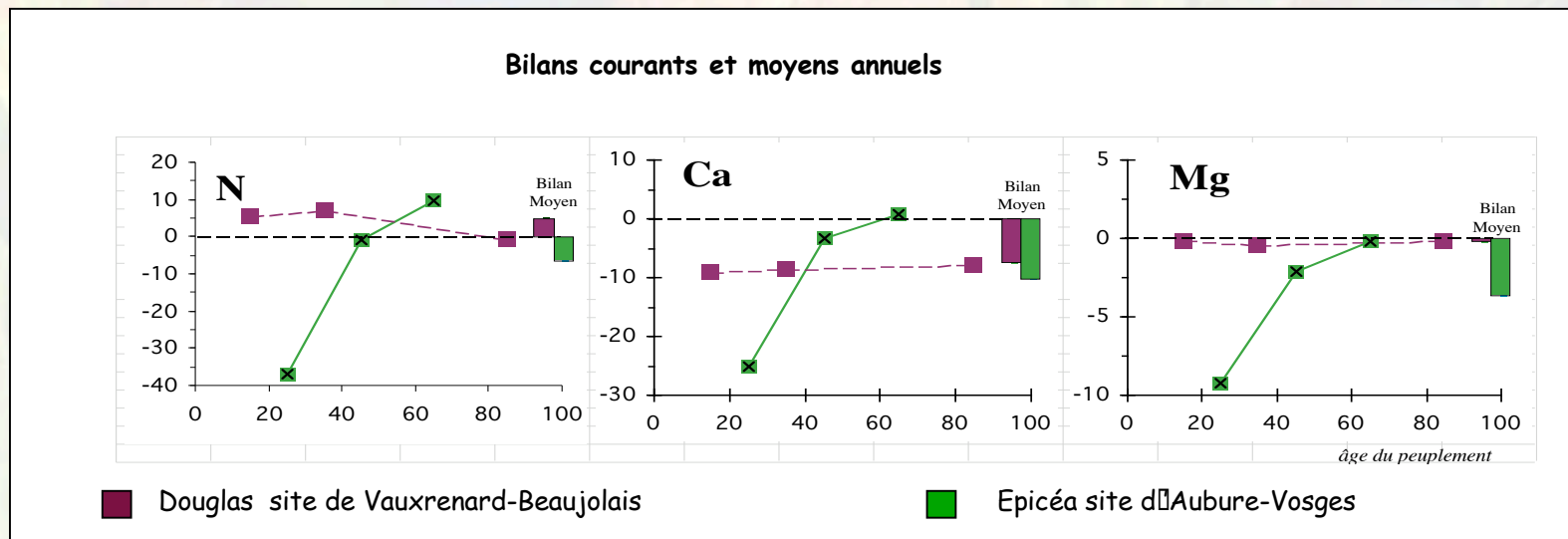
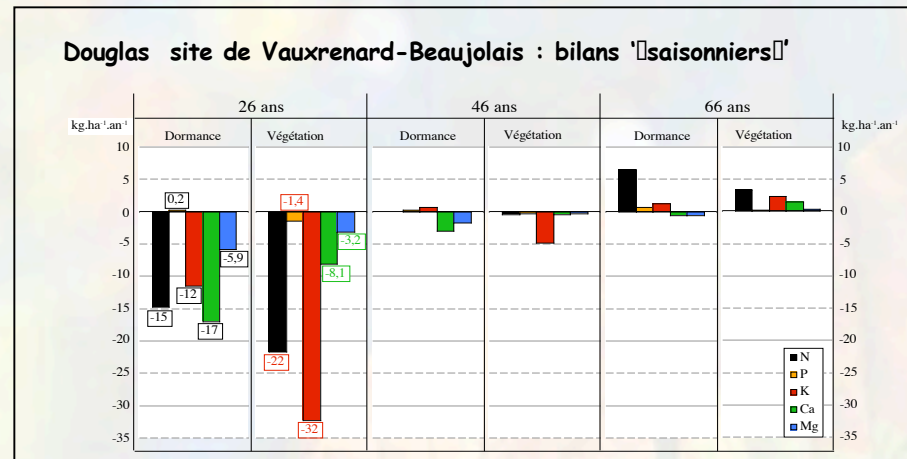
Figure 52 : Principaux flux des cycles biogéochimiques du calcium dans la plantation d'eucalyptus de Kondi et dans la savane et stocks dans les différents compartiments de l'écosystème (Ca échangeable dans le sol) en janvier 1998. Les flux indiqués correspondent aux valeurs moyennes mesurées entre janvier 1998 et décembre 2000 (N.D. : non déterminé).



The background of the slide is a close-up photograph of autumn leaves. The leaves are in various stages of color change, ranging from bright yellow and orange to deep red and brown. The lighting is soft, creating a bokeh effect in the background. The text is centered over this image.

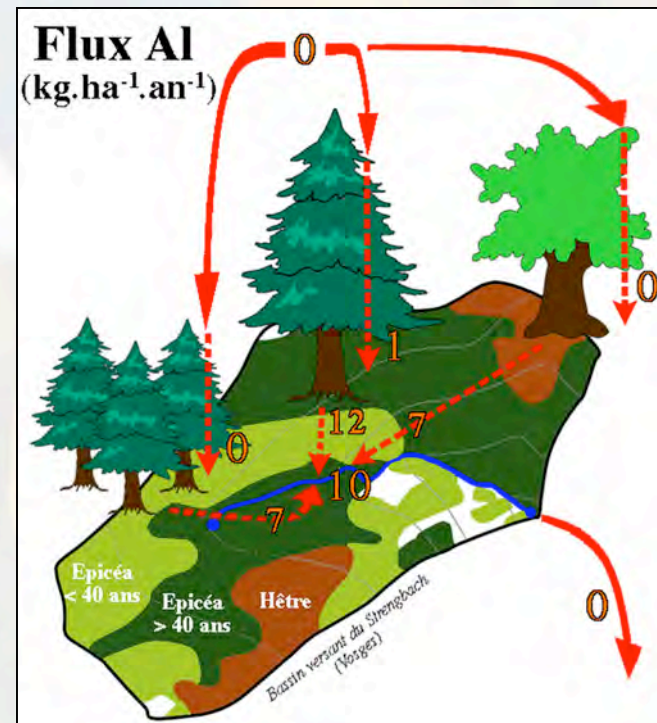
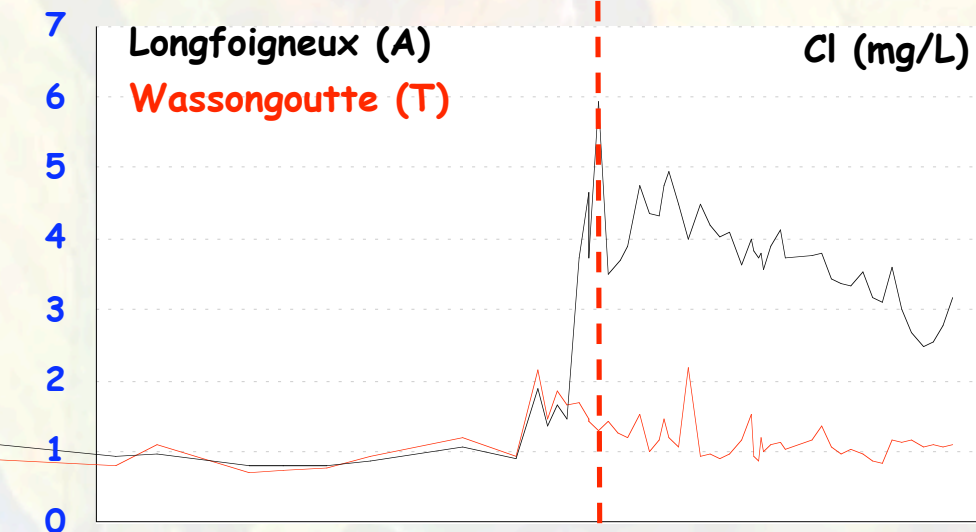
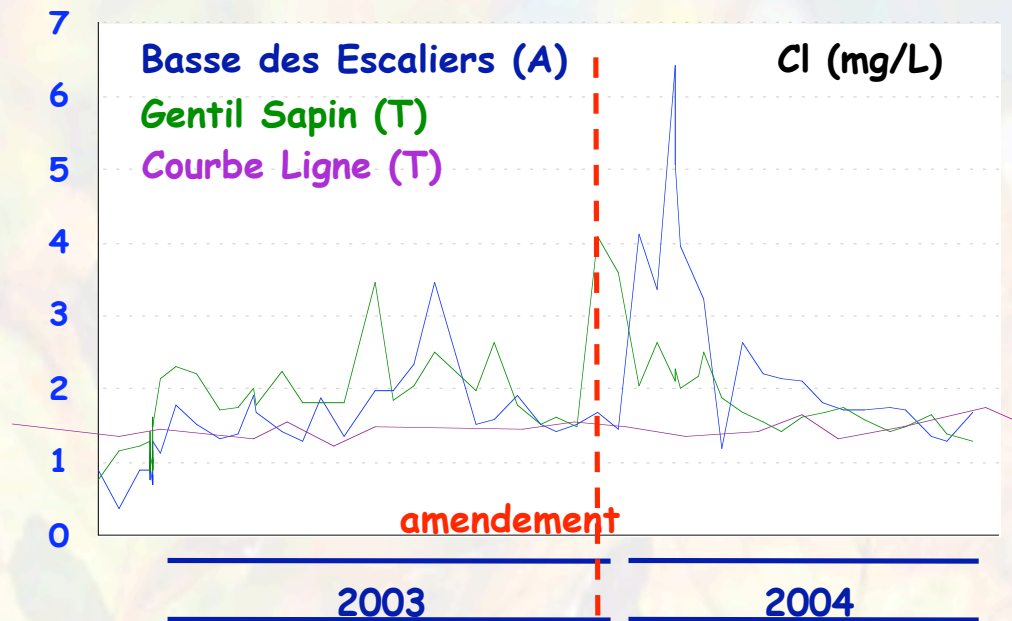
**Les bilans environnementaux à différentes  
échelles de temps**

## Les bilans de fertilité à différentes échelles de temps.....



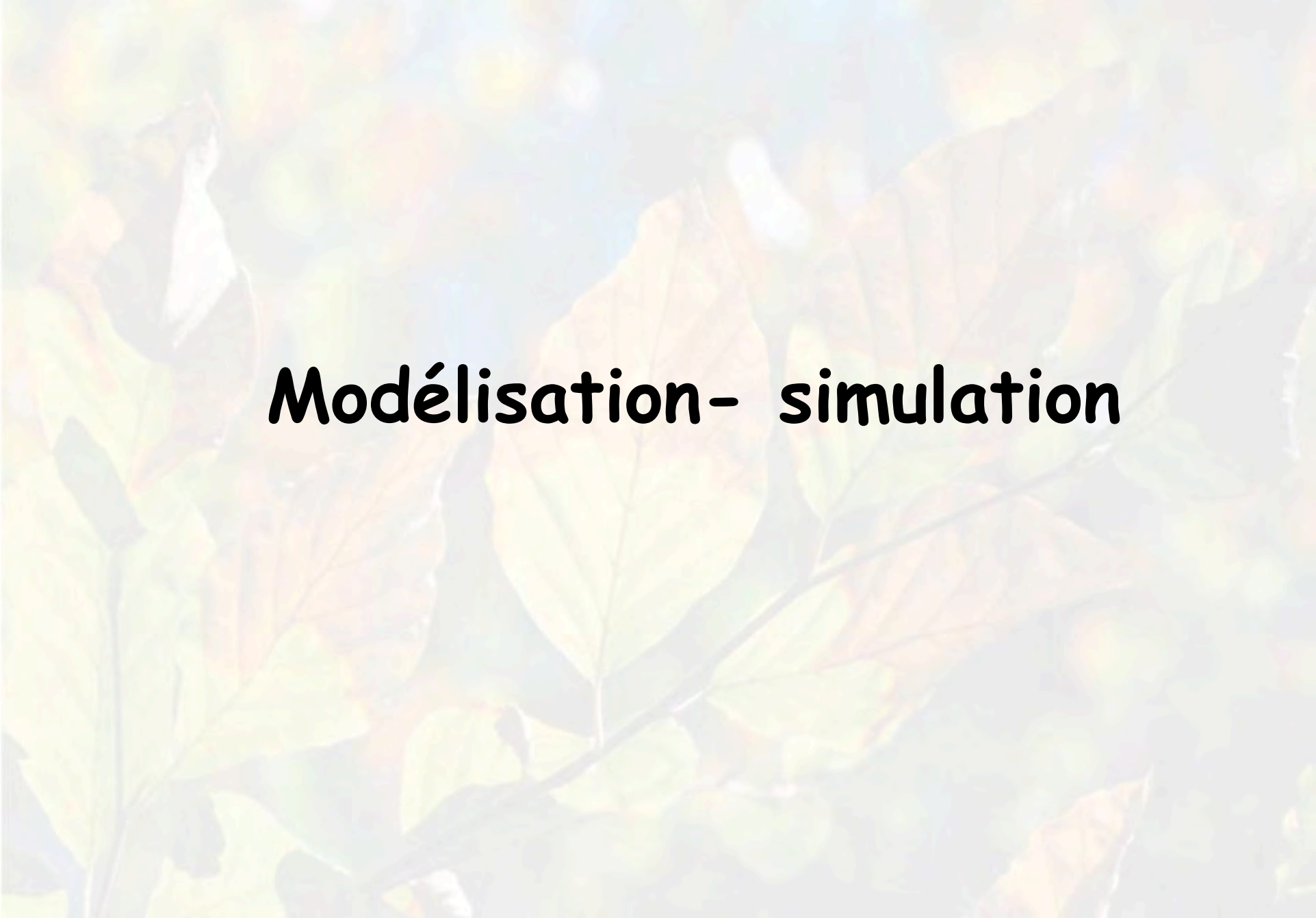

Pas assez de références pour identifier les paramètres qui contrôlent les bilans : sol, histoire, climat, essence, traitement, stade de développement.....

**Le bassin versant, une échelle complémentaire  
mais non identique à celle de l'écosystème**

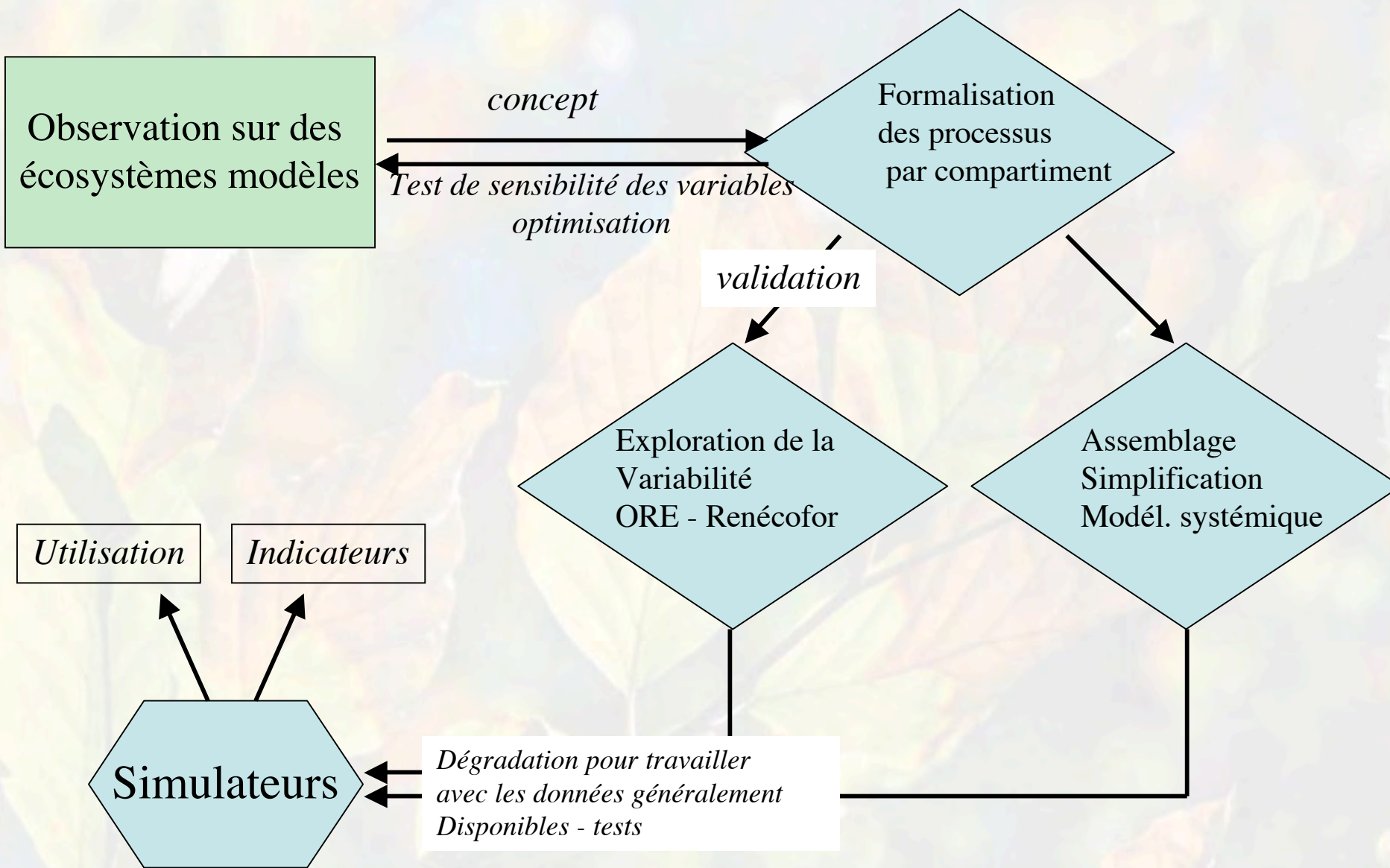


Dambrine et al. 1995

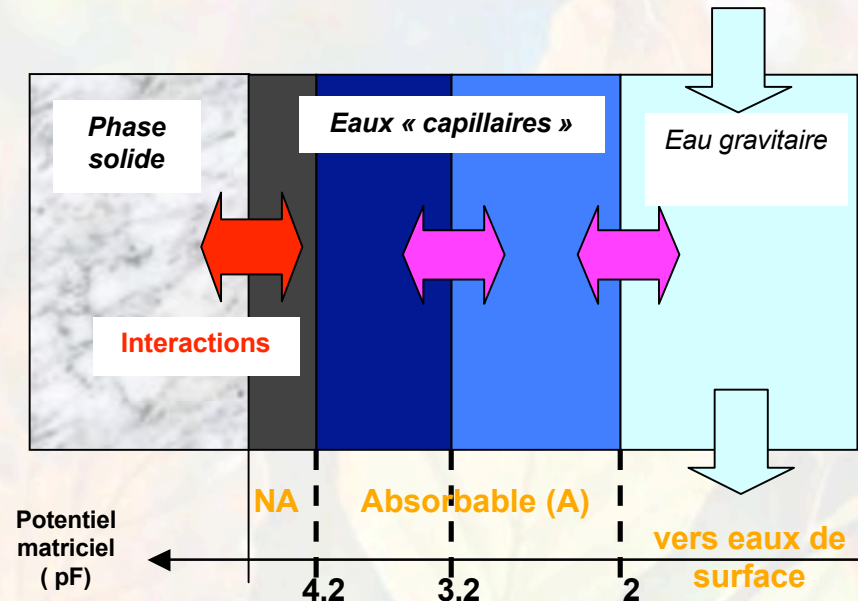
Typologie indispensable  
 ORE - BVRE ?



# Modélisation- simulation



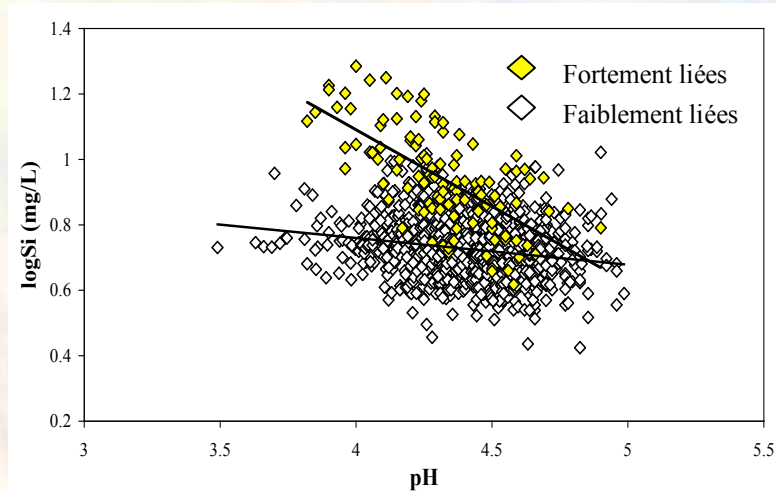
**Exemple : modélisation des mécanismes d'acquisition de la composition chimique des solutions : transfert vers les nappes, solutions nutritives des végétaux.....**



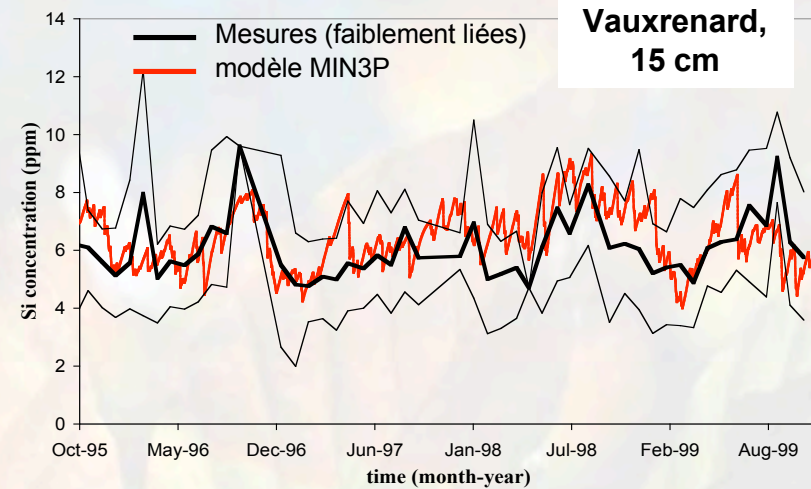
- **Validation modèle conceptuel et étude/hierarchisation/paramétrisation des processus et de leurs mécanismes. Les travaux en milieu tempéré et tropical ont permis de valider le modèle conceptuel dans des situations très tranchées (réserves altérables présentes ou absentes)**



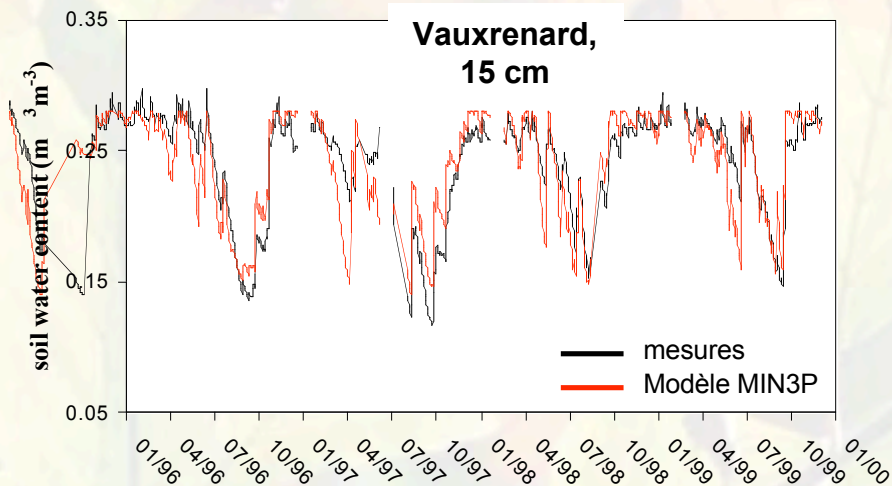
## Mécanismes *in situ*



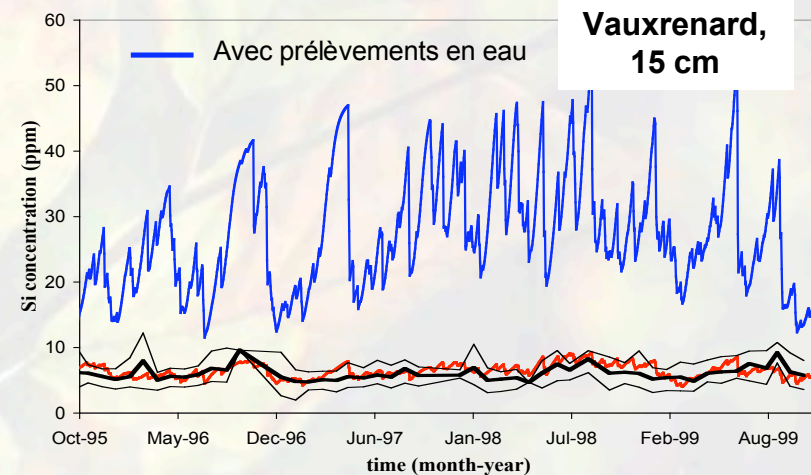
## Couplage : concentration de Si



## Transferts hydriques



## Modèle = outil de réflexion...



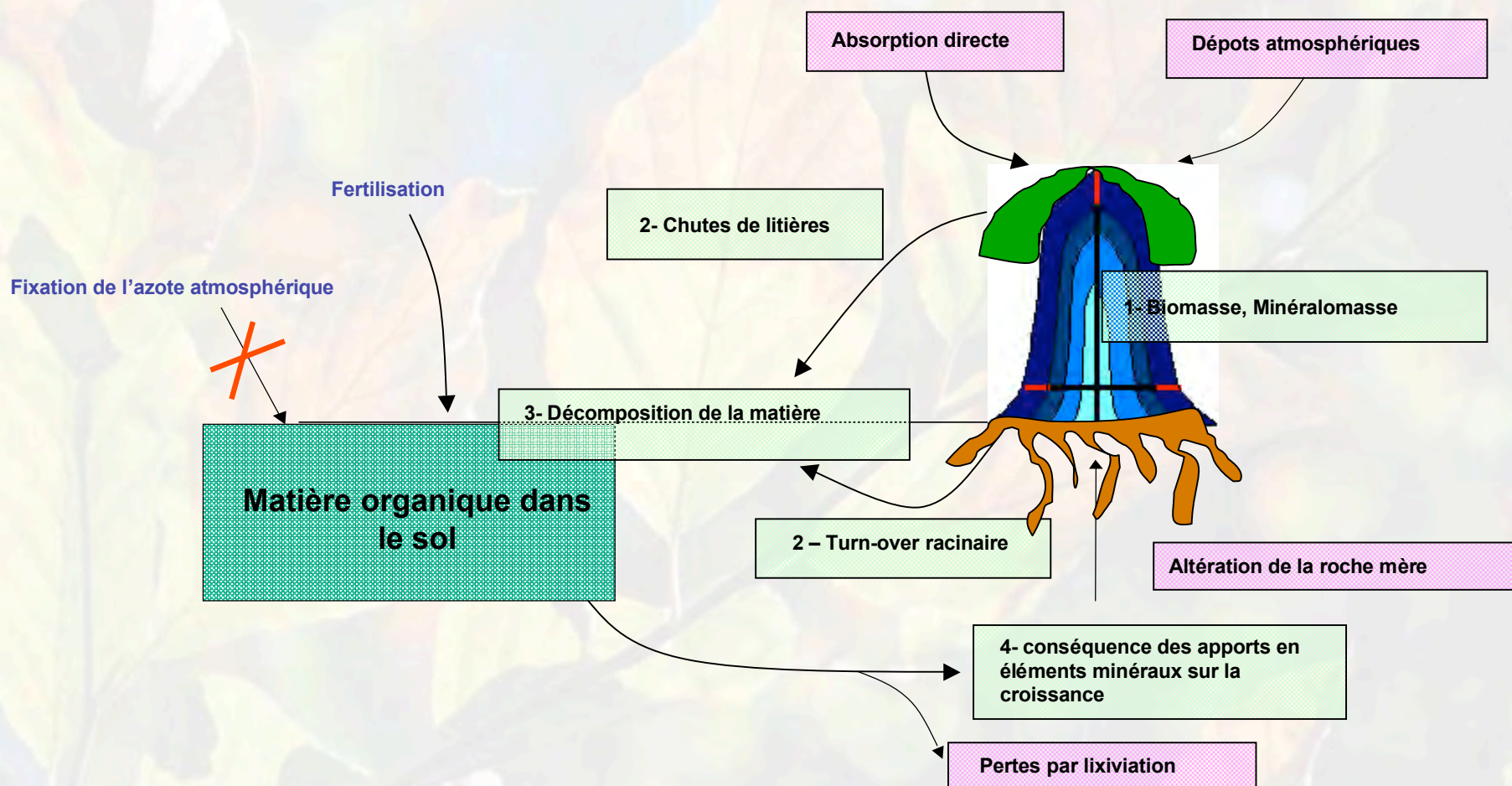
□ **Validation modèle conceptuel et étude/hiérarchisation/paramétrisation des processus et de leurs mécanismes. Les travaux en milieu tempéré et tropical ont permis de valider le modèle conceptuel dans des situations très tranchées (réserves altérables présentes ou absentes)**



Exemple de simulateurs plus finalisés vers les aménagements

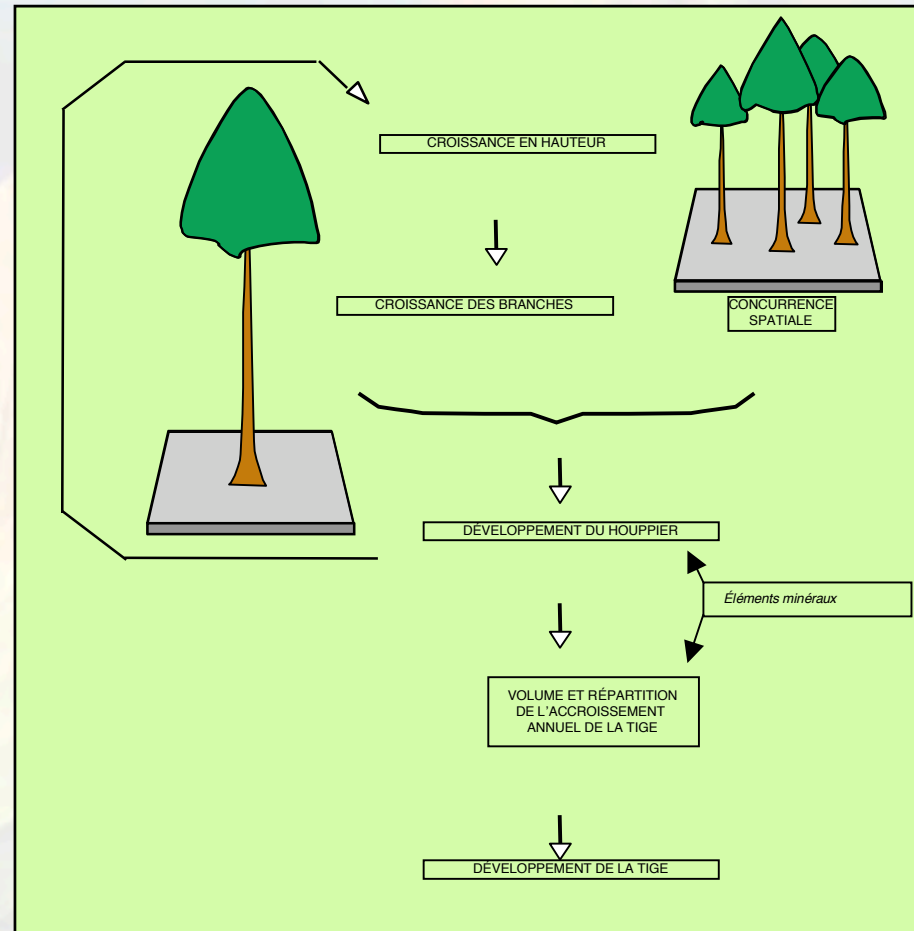
Un couplage Croissance -Cycles **Obtenir des bilans réactualisés en fonction,**  
du temps, des options sylvicoles, des changements environnementaux

**Quelle gestion appliquer pour avoir une production durable dans le temps  
sans dommages environnementaux ?**





		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



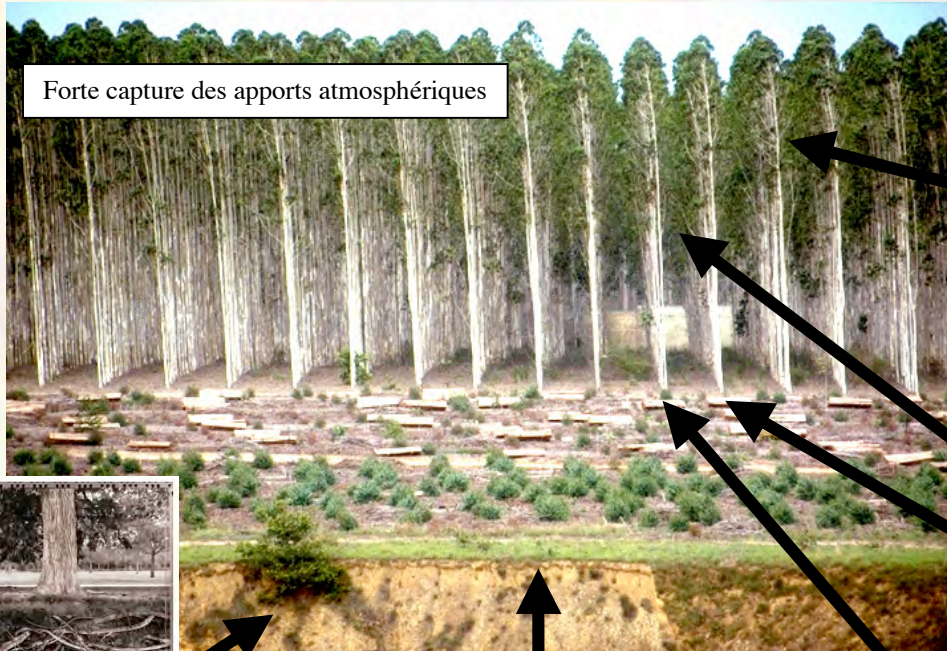
Test de simulation des minéralomasses de peuplements de Douglas  
 (estim = estimé par la méthode conventionnelle Ponette et al. 2001 ; sim = simulé par le modèle SimCoP)

Simulateur SimCoP (Ottorini, 2002)

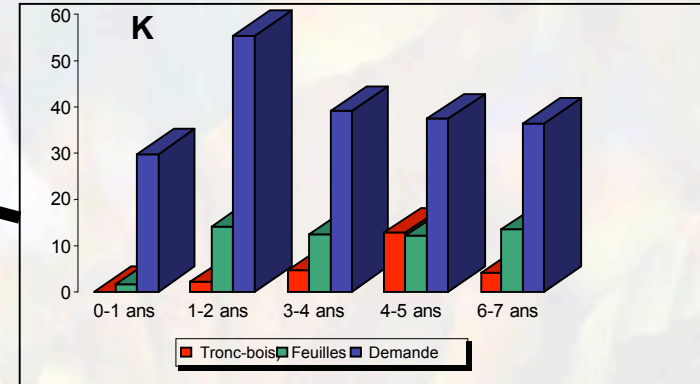
## **Conséquences écologiques et environnementales du changement de végétation**

- **Modification physique : climat (mésopédo)**
- **Contrôle des populations responsables de la biodégradation : conséquences pour les MOS et la production d'azote minéral (compétition, allélopathie)**
- **Contrôle du fonctionnement biogéochimique :**
  - **relation solide - solution**
  - **acteurs de l'altération biologique**
  - **acidification etc....**
- **Modification des flux internes et externes : eau et C et éléments**
- **Changement de l'efficacité de l'utilisation des éléments en fonction des essences : exemple Douglas > épicéa commun**

## Adaptation écologique d'une essence exotique à l'écosystème : l'eucalyptus



Forte capture des apports atmosphériques



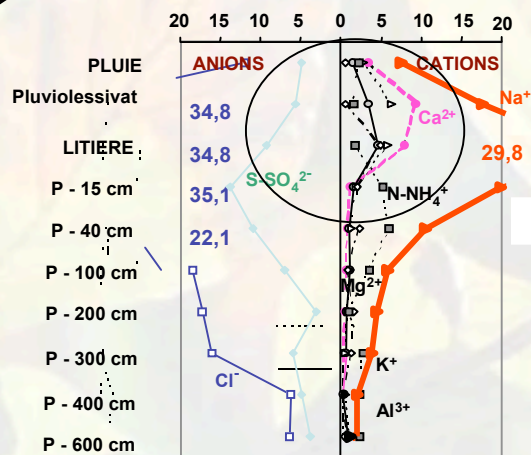
Efficacité des translocations internes d'éléments

Substitution de K par Na dans l'équilibre électrique

Forte restitution d'éléments par les litières



Colonisation racinaire profonde (10 m)

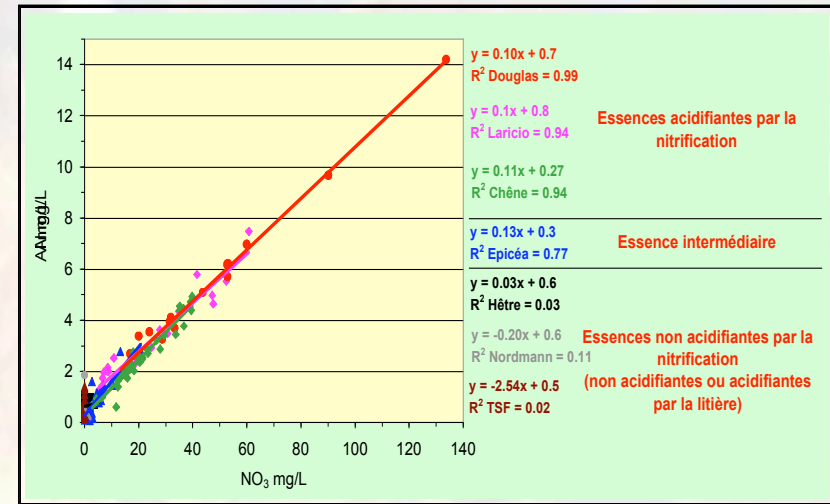
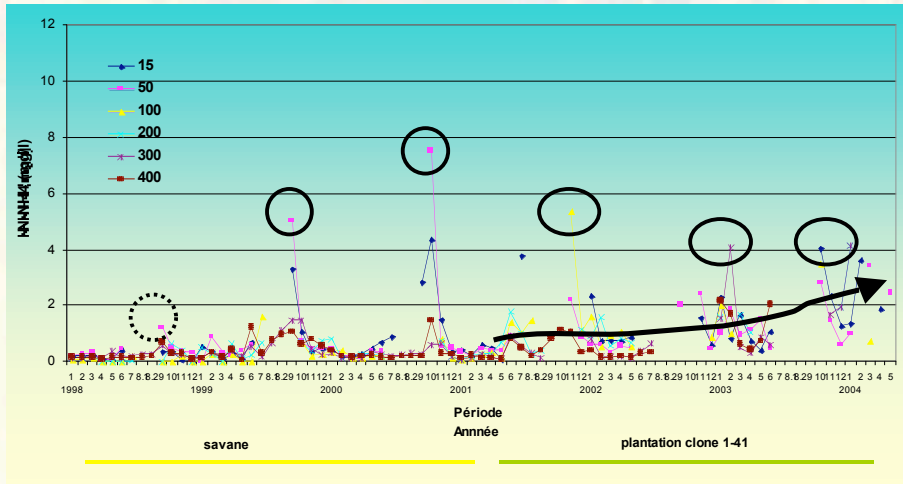


Faibles pertes par drainage (kg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)



Rôle majeur du mat racinaire dans l'absorption minérale

## Conséquences pour les solutions du sol



Drastique modification de la chimie des solutions du sol après substitution d'essence conduisant à un changement du type de fonctionnement du sol

Modification de la minéralisation de Norg et du comportement des solutions après afforestation  
Deleporte et al. 2005

## Relations entre sites ORE et avec les réseaux d'observation

- Exploration de la variabilité des situations
  - minéralomasse Douglas (Renécofor)
  - biodégradation des litières marquées ( $^{15}\text{N}$ ) (Renécofor)
  - effet du traitement des rémanents (réseau SMTP-Cifor)
- Extension de calculs de type BILANS (Renécofor)
- Validation des modèles (ORE, Renécofor , Cifor)
- Test des simulateurs
- Développement méthodologique (ORE)

Projet d'extension des bilans aux sites de niveau 3 du réseau Renécofor

	<b>méthodologie au point</b>	<b>données</b>	<b>recherche d'accompagnement</b>	<b>valorisation du réseau</b>
- apports atmosphériques	oui	Cataenat (1) + spatialisation	non	immédiate
- flux d'altération	non	partielles	oui	différée
- Immobilisation dans la biomasse végétale	oui	partielles	non	immédiate (2)
- pertes par drainage				
. qualité des solutions	oui	partielles	oui	différée
. bilan hydrique	oui	partielles	non	immédiate (3)

*(1) sous réseau de Renécofor*

*(2) les données disponibles concernent le hêtre, le Pin sylvestre l'épicéa commun et le Douglas (Augusto et al., 2000) et quelques autres études individuelles.*

*(3) travaux des équipes Bioclimatologie et Phytoécologie du centre INRA de Nancy*

## Conclusions

- Rôle structurant du réseau ORE pour l'étude des cycles *sl*.
- Intérêt des relations tempéré-tropical
- Importance du 'tandem' observation-modélisation
- Intérêt des sites-ateliers pour structurer les recherches en écologie fonctionnelle dans des approches pluri-échelles et pluridisciplinaires
- Rôle majeur des réseaux d'observation pour la généralisation des modèles ; importance des observations dans la durée avec des protocoles stricts ; nécessaire indépendance
- Intérêt qu'il y aurait à structurer des travaux sur le spatial (BV)
- Relations avec d'autres ORE (prairies ; hydro ?)