

Indicateurs d'état et de prévision de la dynamique de transformation des apports organiques

Laurent Thuriès (1), Sabine Houot (2)

(1) CIRAD « Risque Environnemental Lié au recyclage », 34398
MONTPELLIER Cedex 05

(2) UMR INRA AgroParisTech « Environnement et Grandes Cultures »,
78850 THIVERVAL-GRIGNON



**PHALIPPOU
FRAYSSINET**
la référence organique



Pourquoi des indicateurs?

- **Utilisateurs :**
 - attentes différentes (amendements, engrais, support de culture...)
- **Producteurs :**
 - connaître ses produits, suivre un process (compostage)
- **Conseillers :**
 - préconiser les bons usages
- **Législateurs :**
 - réglementer les usages, prévenir les problèmes, marché C...
- **Scientifiques :**
 - prévoir à long terme les effets, genericité des travaux



Quels effets prévoir?

- Dynamique MO et stockage C
- Activité biologique
- Disponibilité éléments fertilisants (N)
- Phytotoxicité
- Risques environnementaux



Exemples d'outils et d'indicateurs disponibles

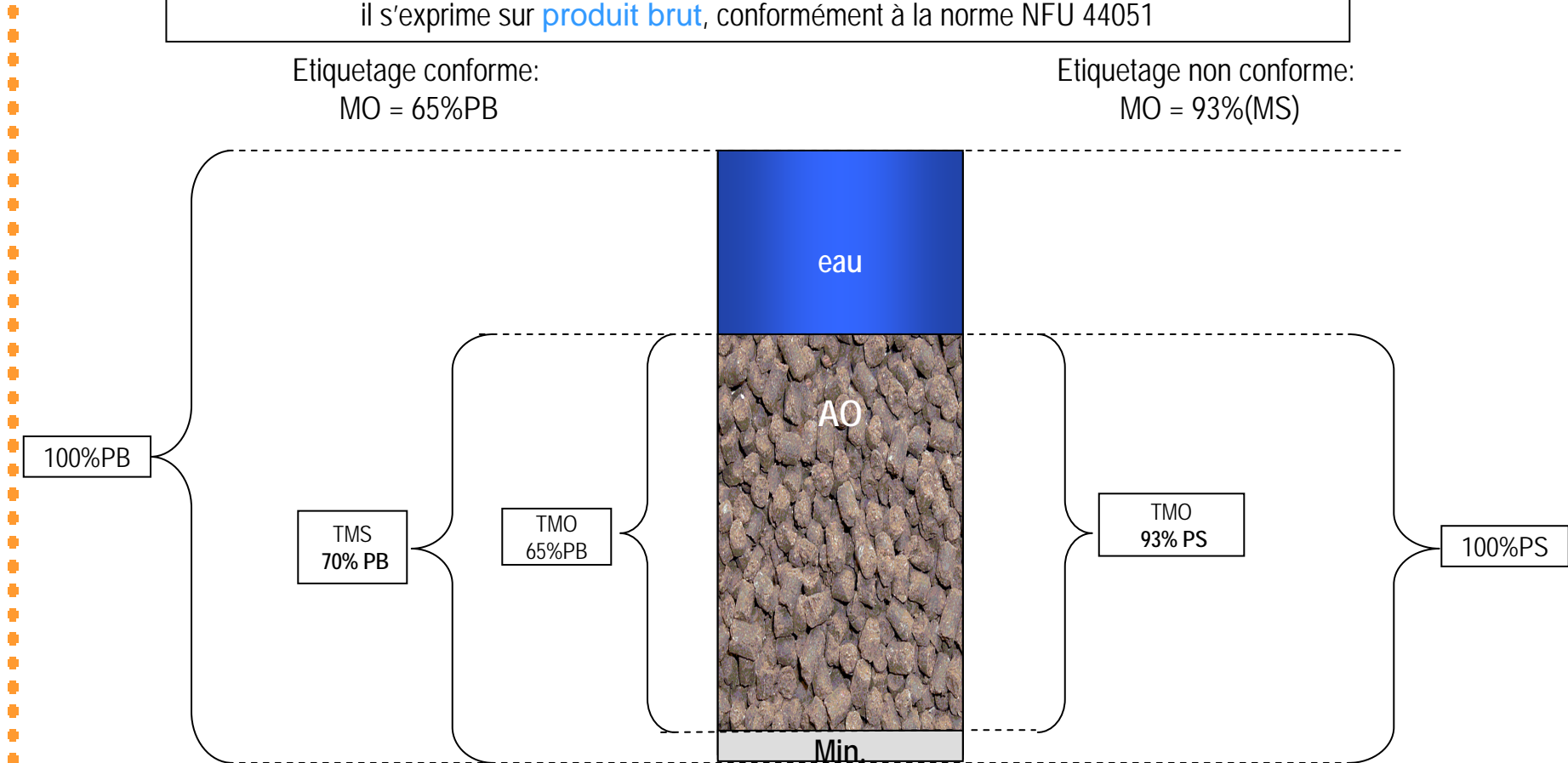
Méthodes	Indicateurs	Utilisation, Effet
Fractionnement biochimique (XPU 44-162)	Indice de stabilité biologique	Efficacité amendante (MO)
Incubations C (XPU 44-163)	Proportion de C _{org} facilement minéralisable	Effet sur activité biologique
Incubations N (XPU 44-163)	N potentiellement disponible	Valeur fertilisante N
Modélisation	Paramètres du modèle	Prévision C, N...
Test auto-échauffement, Solvita...	Maturité des composts	Gérer le procédé de compostage
Test plantes	Phytotoxicité	Utilisation des composts en support de culture

Teneur en matière active d'un AO = [MO] Quel mode d'expression pour l'utilisateur?

Le véritable taux de matière organique :
il s'exprime sur **produit brut**, conformément à la norme NFU 44051

Etiquetage conforme:
MO = 65%PB

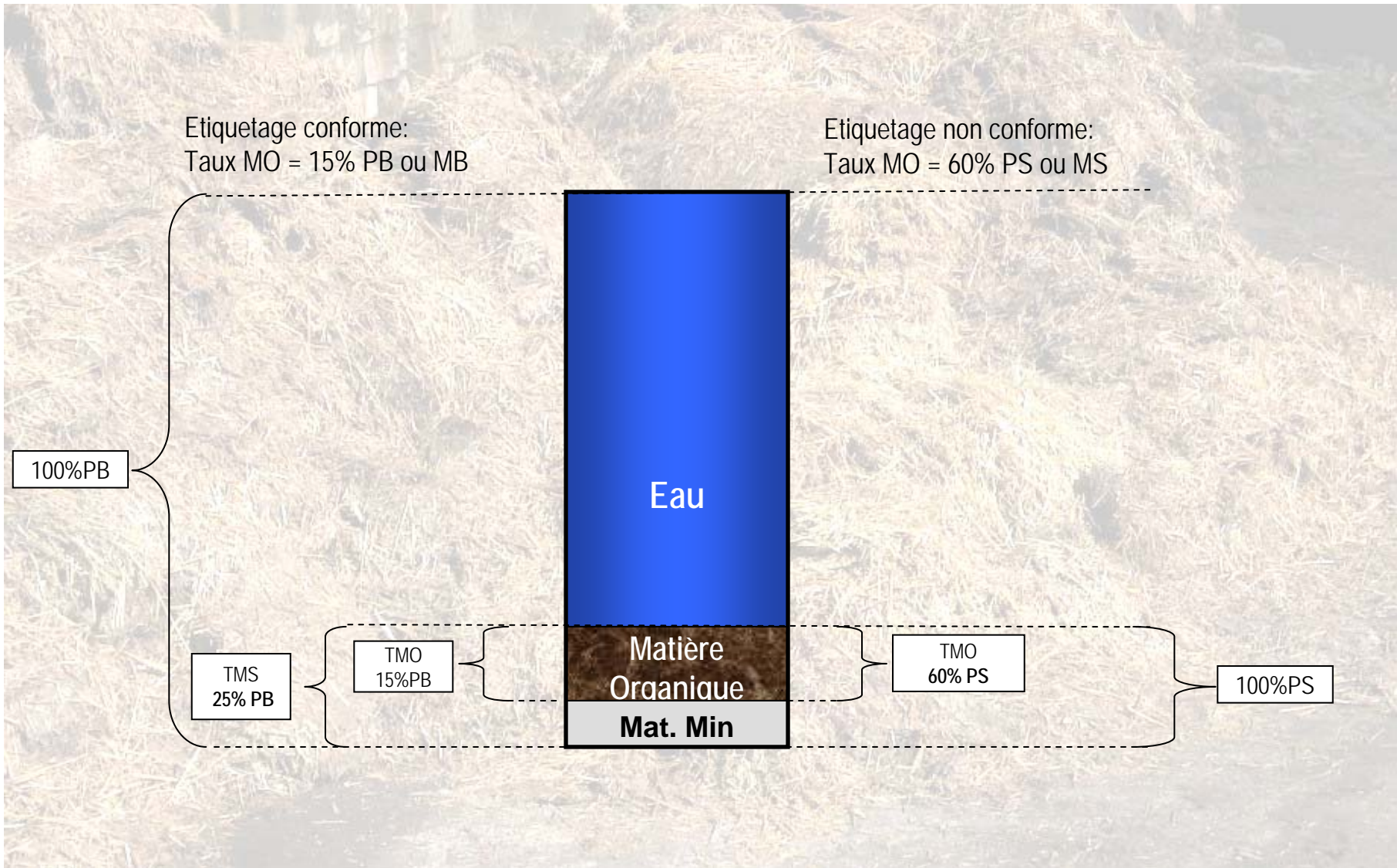
Etiquetage non conforme:
MO = 93%(MS)



RESTONS VIGILANTS :

Il est très simple d'augmenter artificiellement le taux de matière organique, en l'exprimant par rapport à la matière sèche.
La seule mention conforme à la norme NFU 44051 est le taux de matière organique exprimé en % de produit brut.

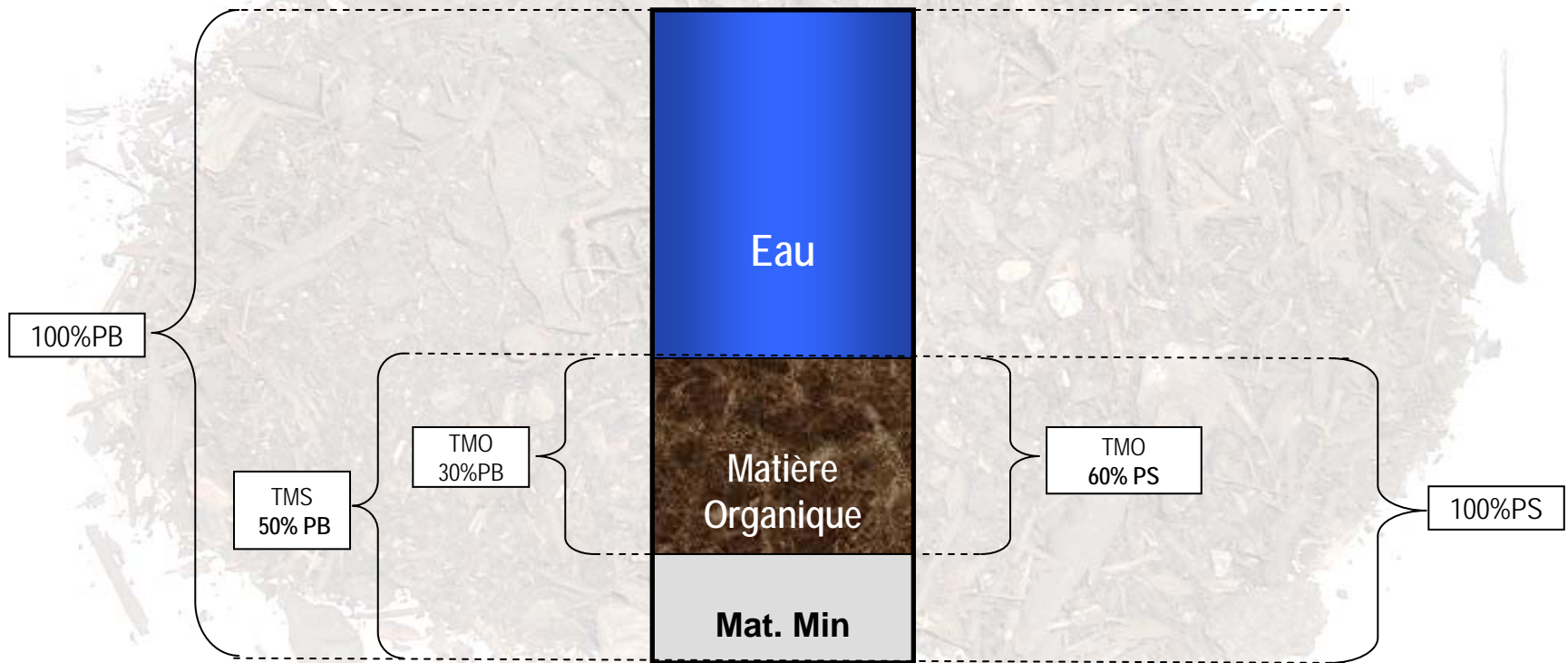
Ex : Fumier de bovin



Ex : Compost de déchets verts

Etiquetage conforme:
Taux MO = 30% PB ou MB

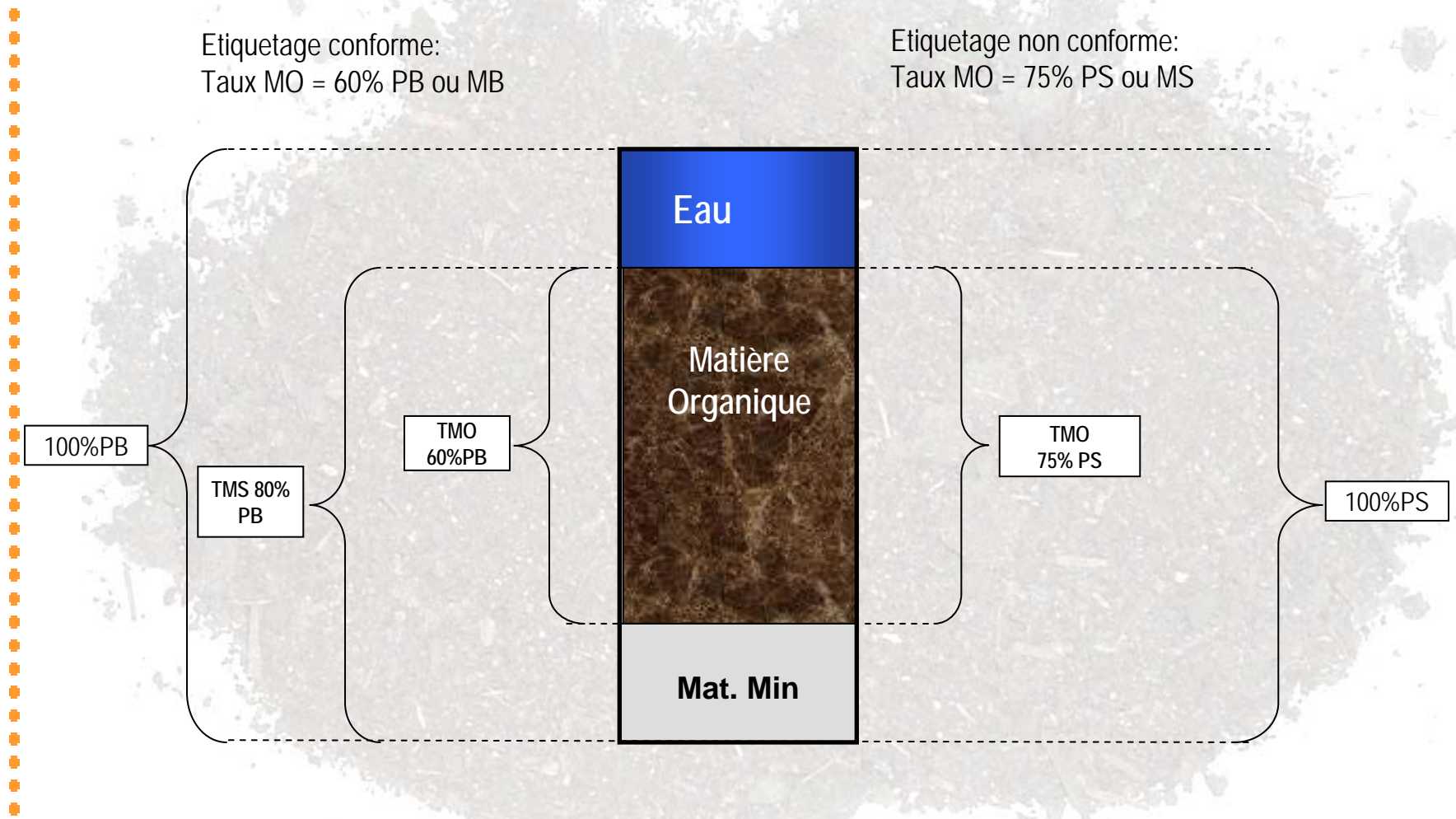
Etiquetage non conforme:
Taux MO = 60% PS ou MS



Ex : Amendement organique

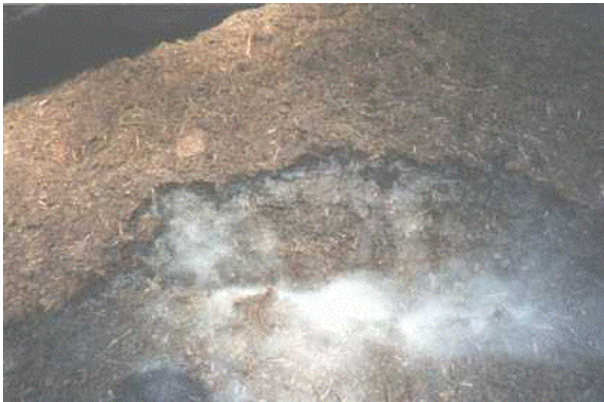
Etiquetage conforme:
Taux MO = 60% PB ou MB

Etiquetage non conforme:
Taux MO = 75% PS ou MS



Rappel: méthodologie et démarche

- * Décomposabilité des apports 'a priori': **indicateurs**
Méthodes et outils
 - par fractionnement biochimique: AFNOR XP U44-162
 - par incubation (potentiel de minéralisation): AFNOR XP U44-163
- * Utilisation de **modèles** de dynamique des MOA
- * Utilisations : *gestion a priori* des apports organiques (nature, forme), choix des matériaux & procédés de transformation
- * Destination : devenir des résidus végétaux, déchets organiques & sous-produits agricoles



← *fertilisants
organiques
industriels*

*composts locaux
en maraîchage
péri-urbain →*



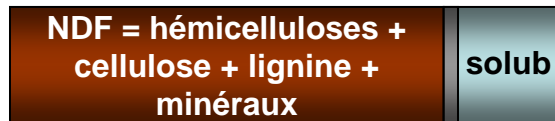
Apport organique brut



Fractionnement biochimique :
méthode de Van Soest **séquentielle** modifiée



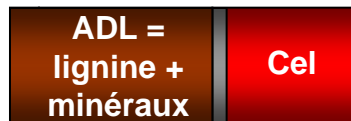
Echantillon séché (40°C)



Extraction au détergent neutre (100°C, 1 heure)
Lipides, sucres simples, tanins, protéines, quelques minéraux



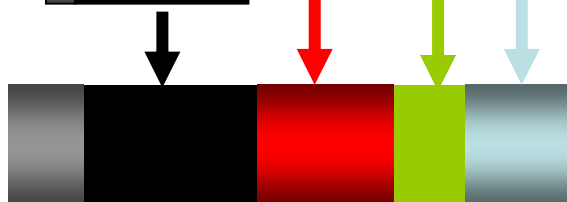
Extraction au détergent acide (100°C, 1 heure)
Hémicelluloses, quelques minéraux



Extraction acide sulfurique 72%
(20°C, 3 heures)
Cellulose, quelques minéraux



Calcination finale (550°C, 6 heures)
Lignine



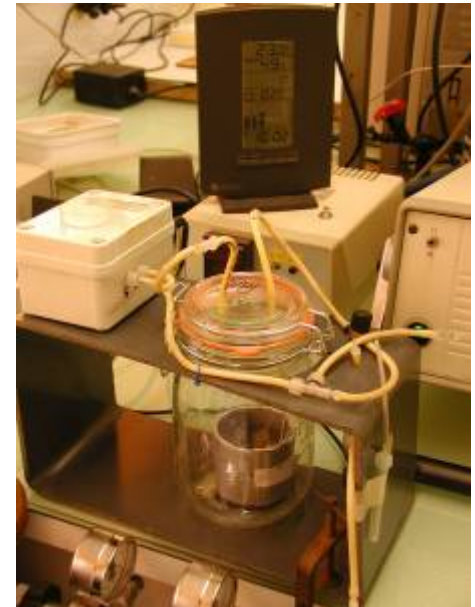
AFNOR (2004) 'Norme expérimentale [XP U44-162](#) ; Amendements organiques et supports de culture ; Fractionnement biochimique et estimation de la stabilité biologique ; méthode de caractérisation de la matière organique par solubilisations successives.' *Afnor*, Saint Denis la Plaine, 15p.

Incubation en conditions contrôlées (potentiel de minéralisation)



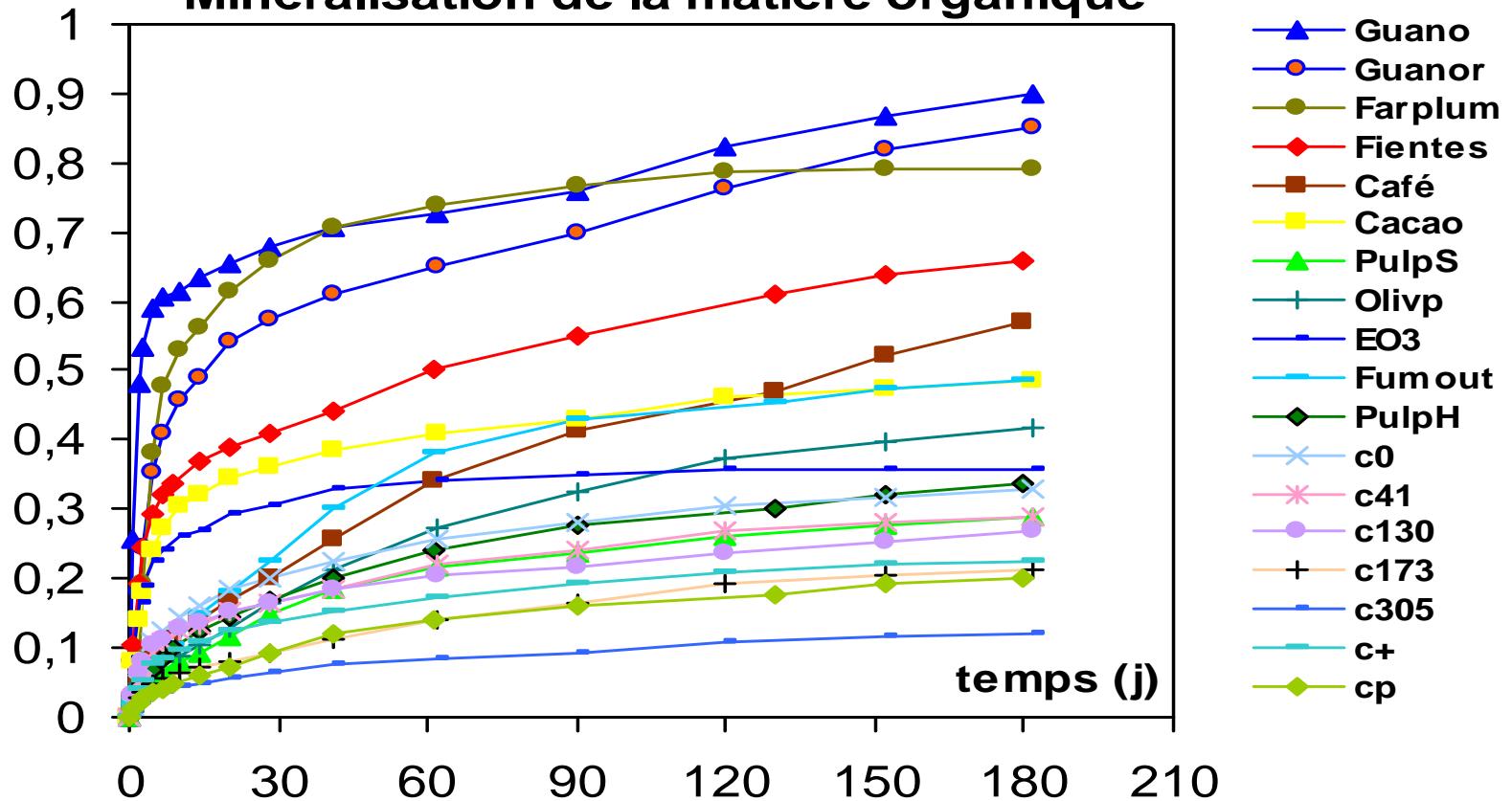
Incubation (stock étuve 28°C)

dosage CO_2 (CPG)
+ extraction NH_4^+ et NO_3^- de la solution du sol
(dosage colorimètre)
Nouveau en 2006: piégeage NH_3
(dosage colorimètre)
+ dosage N_2O (CPG)



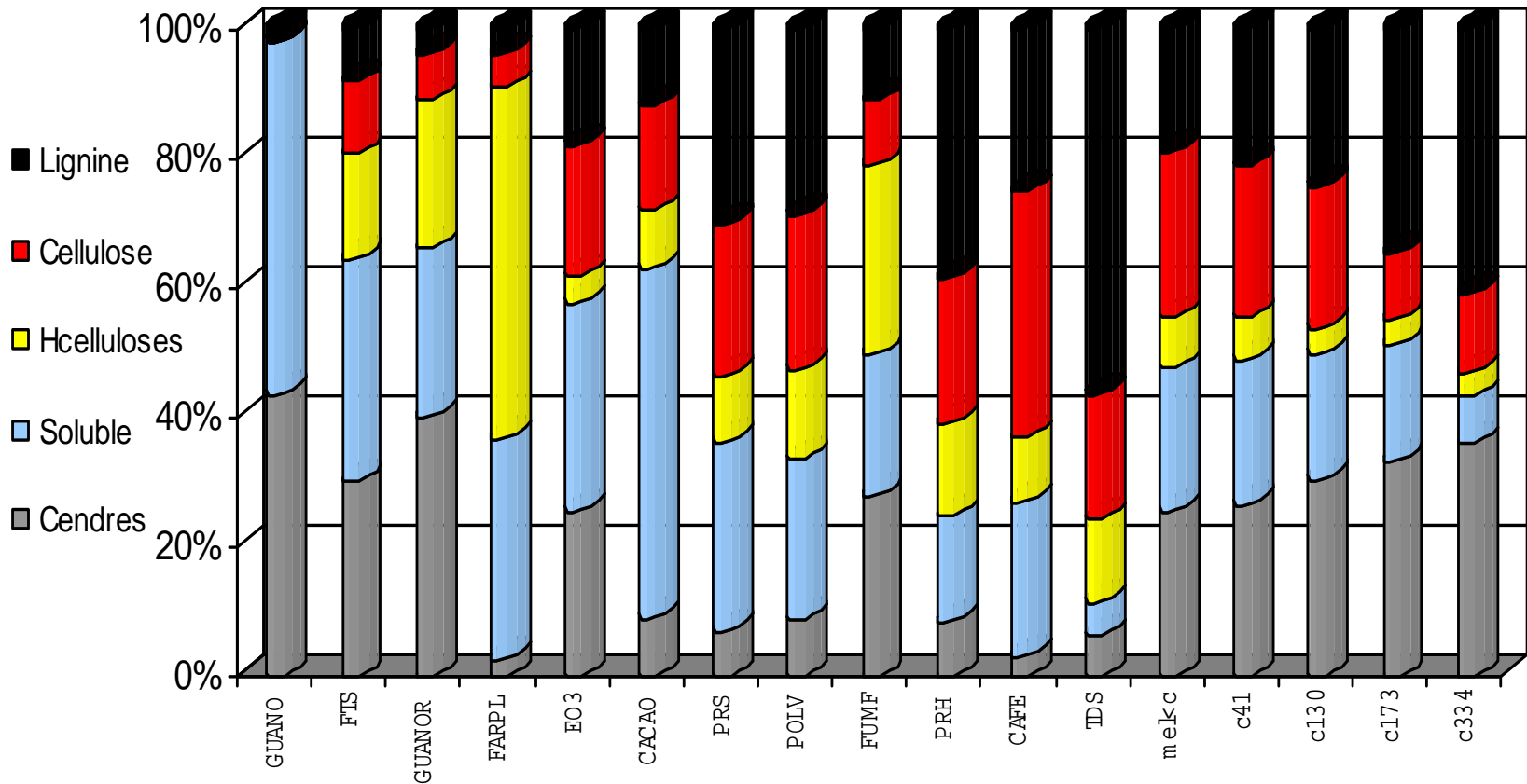
Incubation en conditions contrôlées

Minéralisation de la matière organique



- potentiels de minéralisation
- diversité des dynamiques

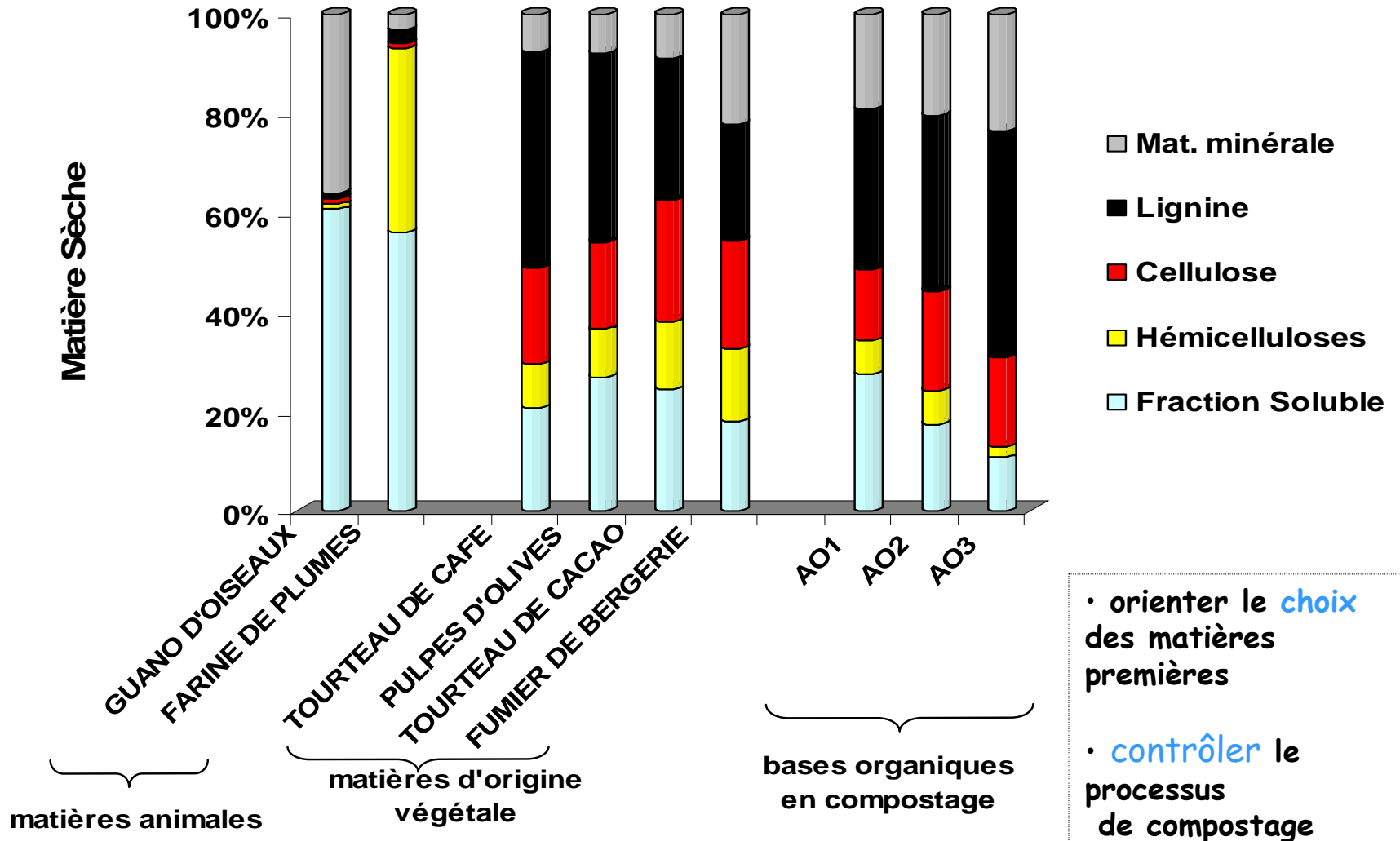
Fractionnement biochimique



• diversité des profils



Fractionnement biochimique : utilité en production



Fractionnement biochimique : utilité en production



Laboratoires associés IRD - CIRAD et Phalippou-Frayssinet

SÉLECTION DES MATIÈRES PREMIÈRES VÉGÉTALES

Caractéristiques analytiques des tourteaux végétaux

COMPARAISON

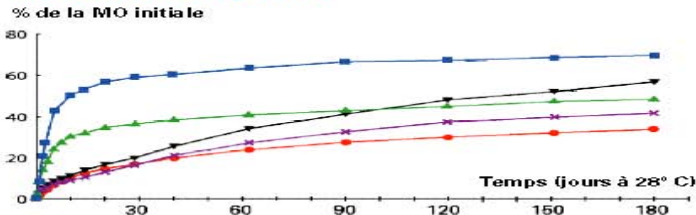
- ▲ Tourteau de cacao
- ▼ Tourteau de café
- ✕ Tourteau de pulpes d'olive
- Tourteau de pulpes de raisin
- Tourteau de soja

MODE EXPÉRIMENTAL (Norme AFNOR XPU 44-163)

- Incubation contrôlée en enceintes closes
- Température : 28°C
- Humidité (75% de la capacité au champ)
- Oxygénation (conditions aérobies)
- Sol : sablo-limoneux
- Dose : 2 t/ha

GRAPHIQUES

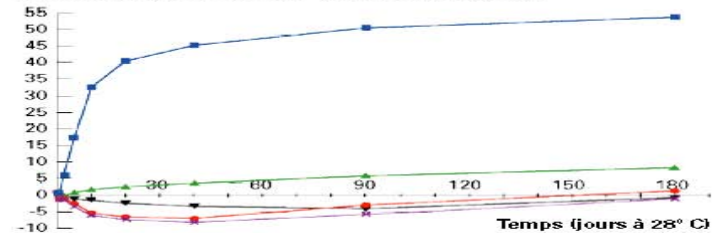
Cinétique de biodégradation de la Matière Organique des tourteaux végétaux



GRAPHIQUES

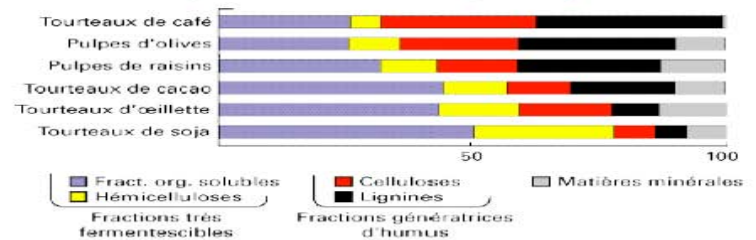
Cinétiques de minéralisation de l'azote organique initial apporté

N minéralisé (NO₃ libéré) en % de N initial apporté



Profils biochimiques des tourteaux végétaux

Base de calcul du potentiel humus (ISB-CBM) en pourcentage de la matière sèche



OBSERVATIONS AGRONOMIQUES

Sous l'appellation générique "tourteaux végétaux", il apparaît des matières premières végétales aux caractéristiques différentes. Par exemple, les tourteaux de café ont une vitesse de biotransformation deux fois plus importante que les pulpes de raisin.

Seuls les tourteaux de soja et de cacao peuvent être épandus bruts sans risque de faim d'azote, les autres doivent être compostés.

A partir des profils biochimiques, nous pouvons distinguer les tourteaux végétaux à fort potentiel humus et ceux qui se dégradent rapidement en libérant l'azote (tourteau de soja,...). Nous basons la sélection des tourteaux végétaux sur leurs propriétés spécifiques. Nos formulations et procédés de fabrication sont adaptés aux caractéristiques particulières de ces différentes matières premières végétales.

- orienter le **choix** des matières premières



Fractionnement biochimique : utilité en production



Laboratoires associés IRD - CIRAD et Phalippou-Frayssinet

COMPOSTAGE ACTIF CONTRÔLÉ ET HUMIFICATION

*Intérêt du compostage sur
la stabilisation et l'humification
des amendements organiques*

COMPARAISON

Végéhumus aux différents stades du Compostage Actif Contrôlé (CAC), tourteaux végétaux (café), fumiers de bergeries et bourres de laine

- Végéhumus 1 (0 jour CAC)
- Végéhumus 2 (2 mois CAC)
- Végéhumus 3 (commercialisé > 4 mois CAC)

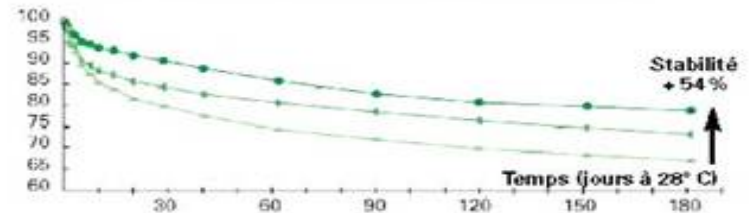
MODE EXPÉRIMENTAL (Norme AFNOR XPU 44-163)

- Incubation contrôlée en enceintes closes
- Température : 28° C
- Humidité (75% de la capacité au champ)
- Oxygénation (conditions aérobies)
- Sol : sablo-limoneux
- Dose : 2 t/ha
- Analyses biochimiques selon norme AFNOR XPU 44-162 (bases calculs ISB-CBM)

GRAPHIQUES

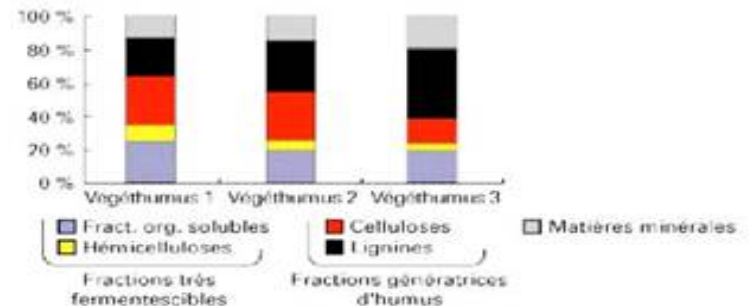
Cinétiques de biodégradation de la matière organique

% de la matière organique initiale apportée (ou % du carbone)



Teneurs en lignine et cellulose : bases des indicateurs de potentiel humique ISB et CBM

% de la matière sèche



- **contrôler** le processus de compostage



Fractionnement biochimique : utilité en production



Laboratoires associés IRD - CIRAD et Phalippou-Frayssinet

COMPOSTAGE ACTIF CONTRÔLÉ ET AZOTE

*Intérêt du compostage
sur la stabilisation
et la disponibilité de l'azote
des amendements organiques*

COMPARAISON

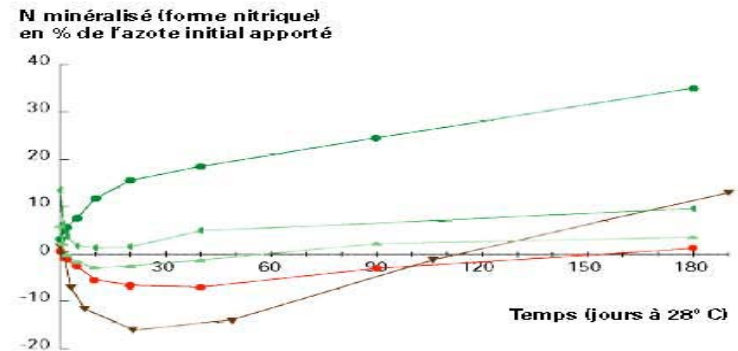
- ▼ Fumier de bovin non composté
- Tourteau végétal non composté (pulpes de raisin)
- Végéthumus aux différents stades du compostage (tourteaux végétaux de café, fumiers de bergeries et bourres de laine)
- Végéthumus début compostage
- Végéthumus composté 1 mois
- Végéthumus poudre stade final

MODE EXPÉRIMENTAL (Norme AFNOR XPU 44-163)

- Incubation contrôlée en enceintes closes
- Température : 28° C
- Humidité (75% de la capacité au champ)
- Oxygénation (conditions aérobies)
- Sol : sablo-limoneux
- Dose : 2 tonnes/hectare

GRAPHIQUE

Cinétiques de transformation de l'azote organique en azote disponible (forme nitrique).



OBSERVATIONS AGRONOMIQUES

L'apport au sol de matières organiques (tourteaux végétaux, fumiers bruts,...) non ou peu compostés entraîne une "fermentation incontrôlée" qui se traduit par une immobilisation de l'azote du sol (N déjà présent + N apporté).

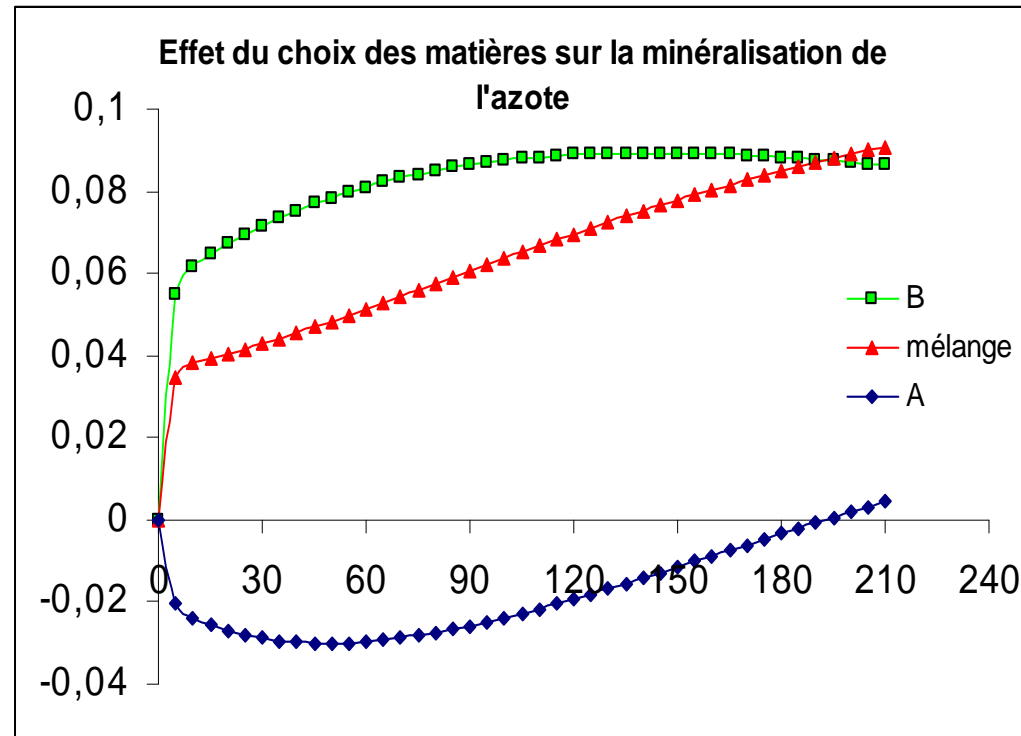
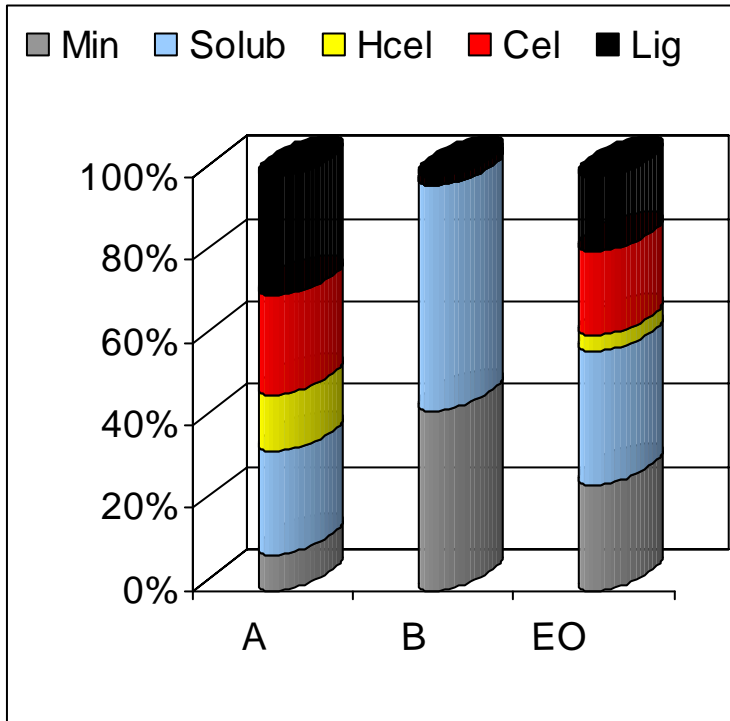
L'azote est utilisé par la biomasse microbienne à son profit et n'est pas disponible pour les cultures.

Un amendement organique élaboré par compostage actif contrôlé (type Végéthumus) n'entraîne pas de risques de faim d'azote.

La stabilisation avec maîtrise du compostage assure une disponibilité progressive des éléments nutritifs (N, P, oligos...) de l'amendement organique.

- **contrôler** le processus de compostage

Incubation et fractionnement biochimique cas de l'élaboration d'un engrais organique



- combiner les matières premières
- élaborer un produit « à la carte » à la dynamique connue a priori

Modèles de transformation des MO Ajoutées



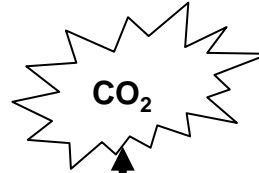
MO Ajoutée

K_1 (f° qualité MO ; sol)



MO du sol
« humus »

sol



CO₂

K_2 (f° climat ; sol)

Milieu tempéré $K_2 = 1$ à 5%
(ex. sol sableux, cl. méditerranéen)

Milieu tropical $K_2 = 4$ à 7%

- Le modèle de Hénin Dupuis (1 compartiment)

K_1 , coefficient iso humique (Hénin et Turc, 1957) :

« l'expression de la quantité d'humus formé en fonction de la quantité de matière sèche du produit organique apporté au sol »

$$K_1 = QH/MS$$

avec QH = quantité d'humus généré par le produit / an

et MS = quantité de Matière Sèche du produit apporté / an

$$\text{Rendement humus} = K_1 \times MS$$

Calculs de K1

Produit A

MO sur PBrut = 600 kg t⁻¹

MS sur PBrut = 400 kg t⁻¹

Rendement humus = 60 kg t⁻¹

$K1 = 60/400 = 0,15$



Produit B

MO sur PBrut = 600 kg t⁻¹

MS sur PBrut = 800 kg t⁻¹

Rendement humus = 530 kg t⁻¹

$K1 = 530/800 = 0,66$



Produit C

MO sur PBrut = 500 kg t⁻¹

MS sur PBrut = 750 kg t⁻¹

K1 annoncé = 0,8

Rendement humus = $0,8 \times 750 = 600$ kg t⁻¹



Impossible avec 500 kg MO t⁻¹

- Valeurs de K1

- Difficilement (pas) contrôlable

1. Influence des conditions pédoclimatiques
2. Coût / durée

Des indices de laboratoire fidèles à K_1 ?

$$ISB = 2,112 - 0,02009 SOL - 0,02378 HEM + 0,0084 LIC - 0,02216 CEW$$

$$CBM-Tr = (0,3221 SOL - 0,7155 HEM + 0,6717 CEL + 1,8919 LIC) MO \cdot 10^{-2} + 0,0271 MMin$$

où SOL, HEM, CEL, CEW, LIC en % MO
MO et MMin en % MS

Cf. Linères et Djakovitch (1993); Robin (1997)

	/MS	K_1	ISB	CBM-Tr
Fumier frais		0.16	0.20	0.24
Fumier déshydraté		0.27	0.23	0.22
Compost de déchets verts		0.22	0.38	0.28
Compost d'écorces		0.21	0.18	0.07
Végéthumus		0.62	0.74	0.66

Les indices
donnent une
image ~ fidèle
des K_1 mesurés

Bilan K_1 et indices (source: SERAIL, 1995-1998)

AFNOR (2004) 'Norme expérimentale [XP U44-162](#) ; Amendements organiques et supports de culture ; Fractionnement biochimique et estimation de la stabilité biologique ; méthode de caractérisation de la matière organique par solubilisations successives.' *Afnor*, Saint Denis la Plaine, 15p.



Autres modèles de transformation des MO ajoutées

N°	Name	Flow AOM = added organic matter	Analytical solution RAOMF at time t	Parameters
m1	Consecutive humification 1 st order 2 CM, 3 parameters		$\frac{(k_{mL} - k_{mR})}{k_{mL} + k_H - k_{mR}} e^{-(k_{mL} + k_H)t} + \frac{k_H}{k_{mL} + k_H - k_{mR}} e^{-k_{mR}t}$	k_{mL}, k_{mR} : 1 st order k. mineralization constants of labile (L) and resistant (R) compartments k_H : humification constant.
m2	Exchange 1 st order 2 CM		$\frac{\lambda_1 + k_m}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2 + k_m}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{\lambda_1 t}$	k_H, k_D : humification and decomposition constants, k_m : mineralization constant (λ_1, λ_2 : roots of 2 nd order linear differential equation $f(k_H, k_D, k_m)$)
m3	Consecutive decomposition 1 st order 2 CM, 3 parameters		$\frac{P_L k_m - k_D}{k_m - k_D} e^{-k_m t} + \frac{(1 - P_L)k_m}{k_m - k_D} e^{-k_D t}$	k_D, k_m : decomposition and mineralization constants P_L : labile AOM fraction
m4	Parallel 1 st order 2 CM, 3 parameters		$P_L e^{-k_{mL}t} + (1 - P_L) e^{-k_{mR}t}$	k_{mL}, k_{mR} : see m1 above P_L : see m3 above
m5	Parallel 1 st order 3 CM, 4 parameters		$P_L e^{-k_{mL}t} + (1 - P_L - P_S) e^{-k_{mR}t} + P_S$	k_{mL}, k_{mR}, P_L : see m4 above P_S : stable AOM fraction
m6	Parallel 1 st order 3 CM, 2 parameters		$P_L e^{-lt} + (1 - P_L - P_S) e^{-rt} + P_S$	P_L, P_S : see m4 and m5 above l, h = constants (fixed values of k_{mL} and k_{mR} for all AOM)
m7	2 nd order kinetic model		$\frac{1}{1 + k\alpha(1 - \alpha)t}$	k : 2 nd order kinetic constant, α : fraction of AOM becoming microbial biomass
m8	1 st order plus 0 order model		$P_L e^{-k_{mL}t} + 1 - P_L + k_{m0}t$	P_L, k_{mL} : see m4 above k_{m0} : 0 order kinetic constant

- modèles multicompartimentaux
- prédictions avec 3 CM > 2 CM
- m4 et m5 vers m6 : TAO

(proportions PL, PR, PS : déterminantes // aux vitesses de minéralisation k_{mL} et k_{mR})

Décomposabilité des apports 'a priori': modèles - Mécanistes (à compartiments fonctionnels)

Ex. Transformations des Apports Organiques (TAO)

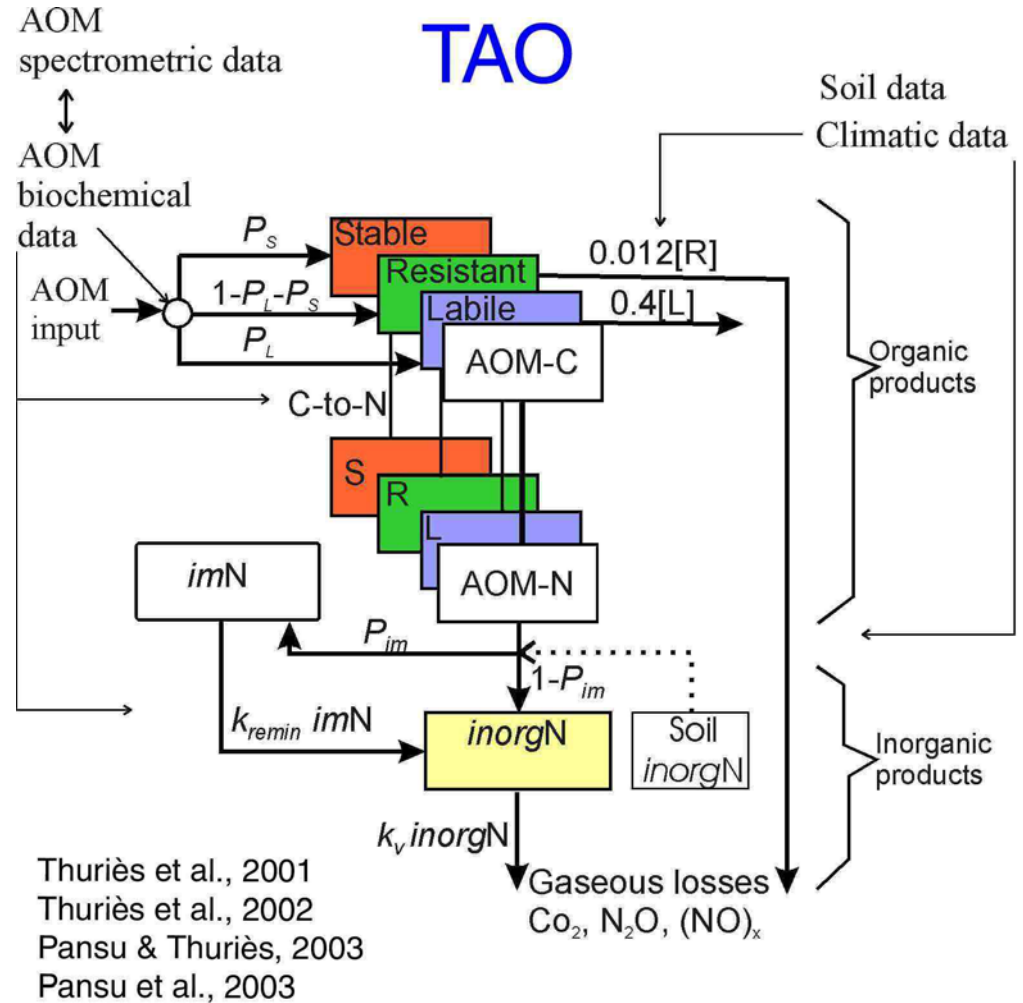
- * 3 compartiments fonctionnels,
- * Echelle de temps : jour, mois (saison)

Intérêts:

- bon pouvoir explicatif,
- comparer les dynamiques d'AO
- entre eux & de couples AO-sols

Produits : des indicateurs

- C (potentiel humique),
- N (potentiel minéralisation)





TAO Carbone

$$P_L e^{-k_m L t} + (1 - P_L - P_S) e^{-k_m R t} + P_S \quad \text{Avec } k_{mL} = 0.4 \text{ j}^{-1} \text{ et } k_{mR} = 0.012 \text{ j}^{-1}$$

2 jeux d'équations :

$$f^\circ \text{ de la composition des AOM (C et Lig/N)} \quad CO = 0.71 \left(\frac{C - \bar{C}}{s_C} + \frac{LIG/N - \overline{LIG/N}}{s_{LIG/N}} \right)$$

CO

$$- \quad PL' = 0.35 \text{ fsol} + 2.2 N_{AOM} - 0.010 \text{ Lig/N}_{AOM}$$

$$- \quad PS = 3.63 \text{ Lig}$$

$$+ \quad PL' = 0.099 \text{ flab} + 0.14 \text{ Hem}$$

$$+ \quad PS = 1.61 \text{ Lig} + 0.62 \text{ Ash}_{AOM}$$

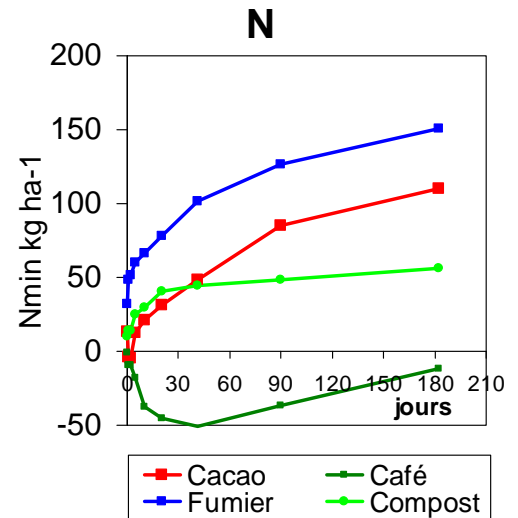
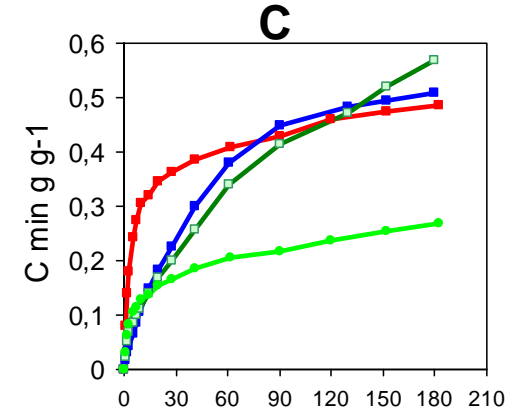
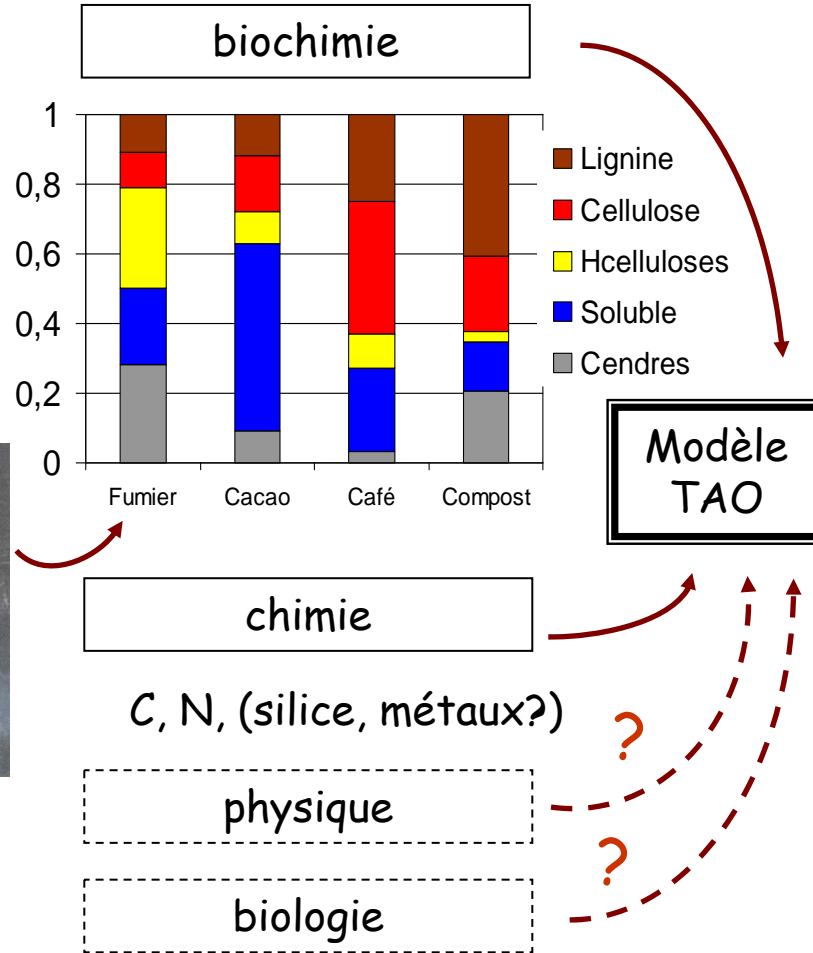
Sol, Hem, Cel, Lig, Ash_{AOM} = mass fraction of the organic extracts: soluble, hemicelluloses, cellulose, lignin in AOM, and inorganic part of AOM, respectively,

NAOM = nitrogen in whole AOM,

flab = (Sol + Hem)/(Sol + Hem + Cel + Lig),

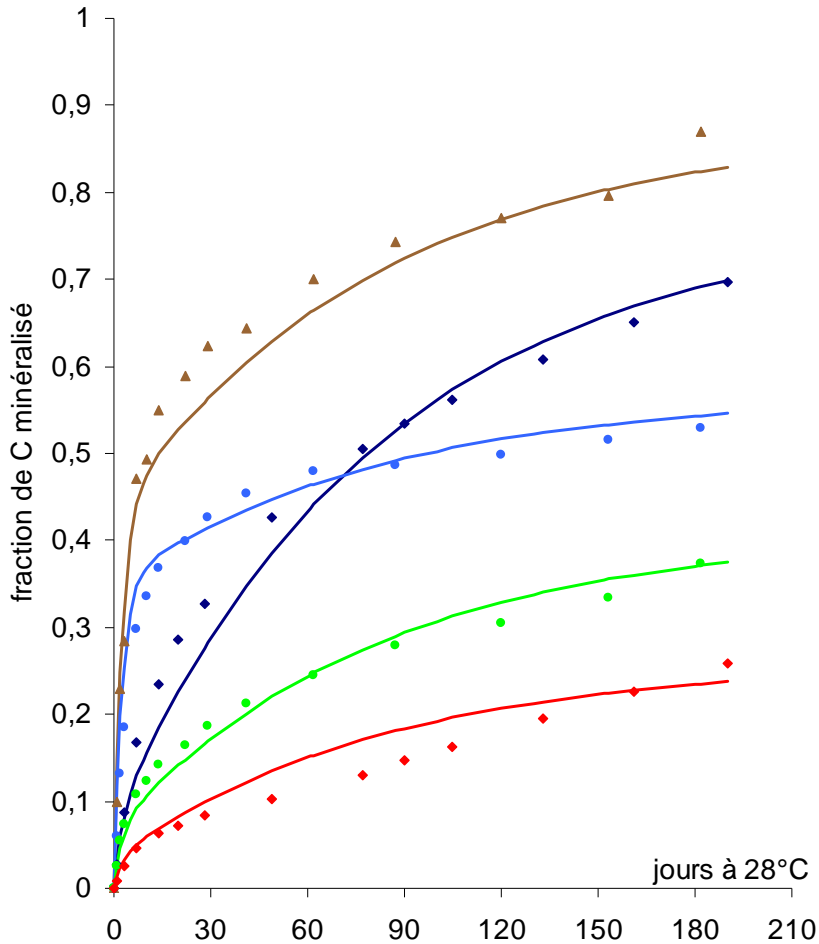
fsol = Sol/(Sol+Hem+Cel+Lig),

- Compartiments fonctionnels = f^q (fractions mesurables)
- Outils 'de laboratoire' (texture, contact sol, faune... difficilement ou peu pris en compte)





TAO Carbone: de la R&D à la production



▲ SP Propositions de matières premières :
tri, usages possibles, rejet

◆ A Amendements organiques:
- suivi du compostage
- création articles

● EV Engrais organiques:
- calculs en formulation

● BA

— p_BA

◆ I

— p_I



Utilité en fabrication (Exemples Phalippou-Frayssinet)

Fichier Edition Affichage Insertion Format Outils Données Fenêtre ? Tapez une question

Arial 10 G I S

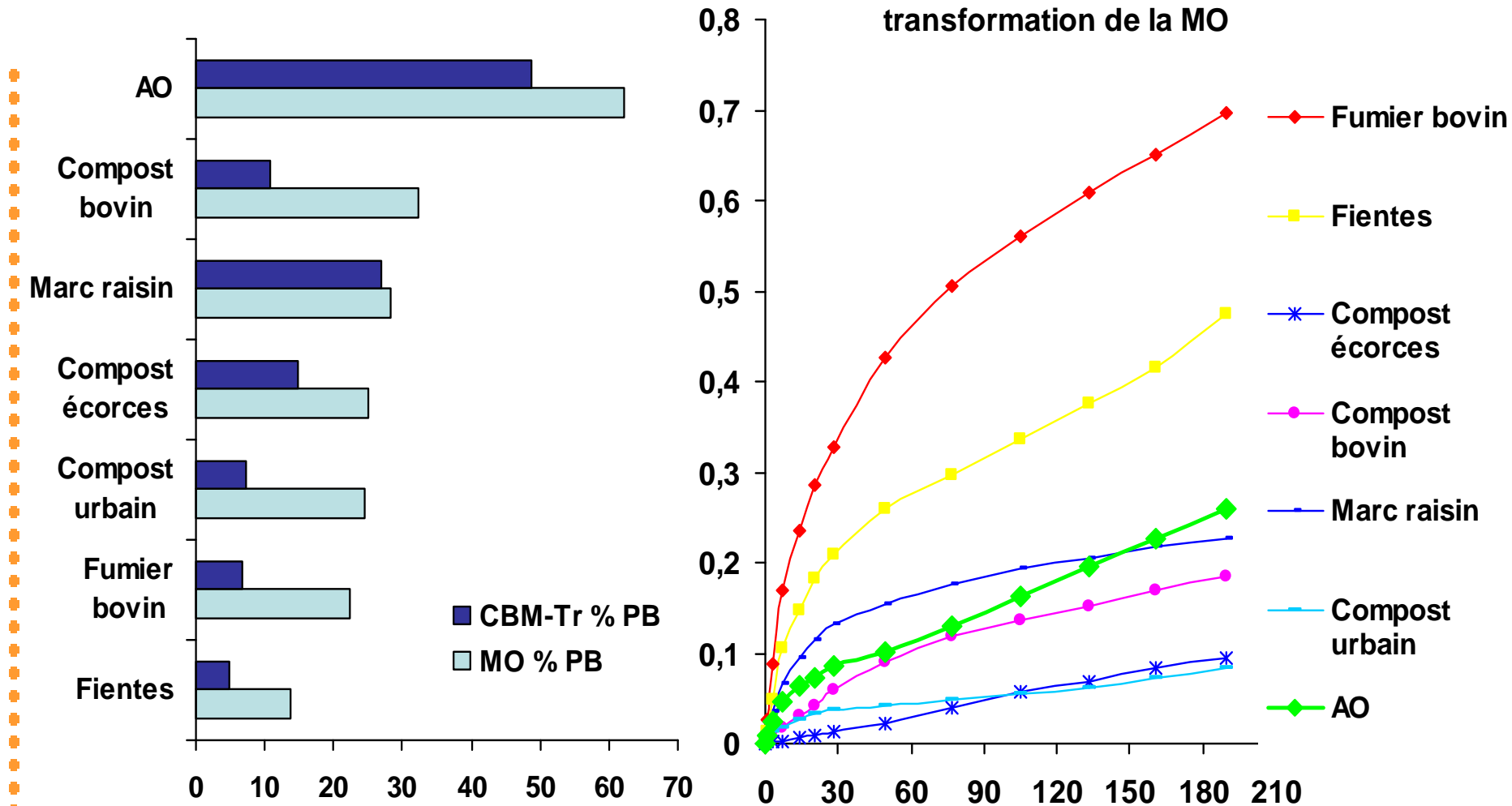
Q1 fx

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1																
2						Entrée par les teneurs exprimées en %PB (et MS%PB)										kg/t PB
3						% Produit Brut										
4			nature		nom	MS	MO	SOL	HCEL	CEL	LIG	CEW	ISB	Tr	humus	somme
5			Autre Matière Première		Fumier de bovin	26,2	22,3	5,4	5,62	8,9	2,2			6,8	68	22
6			Autre Matière Première		Tourteaux d'oeillette	40,7	34,9	17,4	6,4	7,4	3,7			11,3	113	35
7			Produit PF		BIOMASSE	51,0	41,7	12,7	3,6	12,5	12,8			28,1	281	42
8			Produit PF		VEGEPLAN	78,4	46,3	9	3	14	22			30,6	306	46
9			Produit PF		RICHUMUS	84,0	71,6	24	10	15	23			46,2	462	72
10			Produit PF		BACTOR	72,0	58,2	17,1	3,9	12,2	25,0			47,4	474	58
11			Produit PF		100%	78,5	62,3	18	6	11	28			48,8	488	62
12			Produit PF		VEGETHUMUS	81,0	64,0	14,8	3,5	13,0	32,6			57,7	577	64
13			Produit PF		REPULSSOR	66,3	57,5	26,0	8,9	7,8	14,7			30,5	305	57
14			Produit PF		VEGEVERT	80,2	67,1	28,2	3,4	15,6	19,8			46,0	460	67
15			Matière Première PF		TOURTEAUX DE CAFE	40,80	40,6	10,5	2,4	15,2	12,2			34,6	346	40
16			Matière Première PF		FUMIER DE BERGERIE	63,70	46,0	10,6	2,2	12,5	20,7			36,1	361	46
17			Matière Première PF		PULPES D'OLIVE	92,41	84,9	28,0	14,2	19,0	22,7			50,5	505	84
18			Matière Première PF		COQUES DE CACAO	89,50	81,9	41,3	8,86	15,8	15,0			42,3	423	81
19			Matière Première PF		TOURTEAUX DE CACAO	89,15	80,4	41,8	8,5	11,1	18,3			44,8	448	80
20			Matière Première PF		TOURTEAUX DE SOJA	86,16	79,6	43,4	24,0	7,2	5,4			11,1	111	80
21			Autre Matière Première		Fientes de Poules	85,15	58,1	28,5	13,5	9,2	6,4			12,7	127	58
22			Autre Matière Première		Fientes de Cailles	43,35	35,0	25,7	5,1	4,2	0,8			7,3	73	36
23			Autre Matière Première		Tourteaux de colza	87,88	80,9	57,0	7,1	10,2	6,6			30,2	302	81
24			Matière Première PF		GUANO D'OISEAUX	78,23	51,5	42,6	7,1	0,1	1,6			8,2	82	51
25			Autre Matière Première		Fientes de volailles sur paille	18,82	13,6	4,91	2,5	2,9	2,5			4,8	48	13
26			Autre Produit		Compost de déchets verts	41,12	26,7	13,66	1,7	3,5	5,7			10,9	109	25
27			Autre Produit		Compost d'écorces sans urée	45,84	25,1	4,64	0,2	6,7	10,8			14,7	147	22
28			Autre Produit		Fumier de bovin composté	57,23	32,4	14,90	2,4	7,9	5,3			10,9	109	31
29			Autre Produit		Compost de boues	46,40	29,6	12,01	1,6	6,0	5,0			10,7	107	25
30			Autre Produit		Marc de raisin composté	59,35	34,6	22,4	0,0	2,4	9,7			16,2	162	35
31			Autre Produit		Compost d'ordures ménagères	47,05	24,5	8,83	2,3	5,0	4,7			7,3	73	21
32			Autre Matière Première		Coques de tournesol	85,54	82,2	14,88	14,5	33,7	19,1			51,3	513	82
33			Autre Matière Première		Ecorces broyées (pin maritime)	41,39	39,9	3,29	0,0	11,4	25,2			54,4	544	40

ComparHumus (entrée PB) / ComparHumus (entrée MS) / ComparHumus (entrée MO) / FIBREBILAN LT OK102006 / base SPIR tous VS072006

- Tableur ComparHumus™ (contrôle, alerte) / Matières premières, produits finis, concurrence

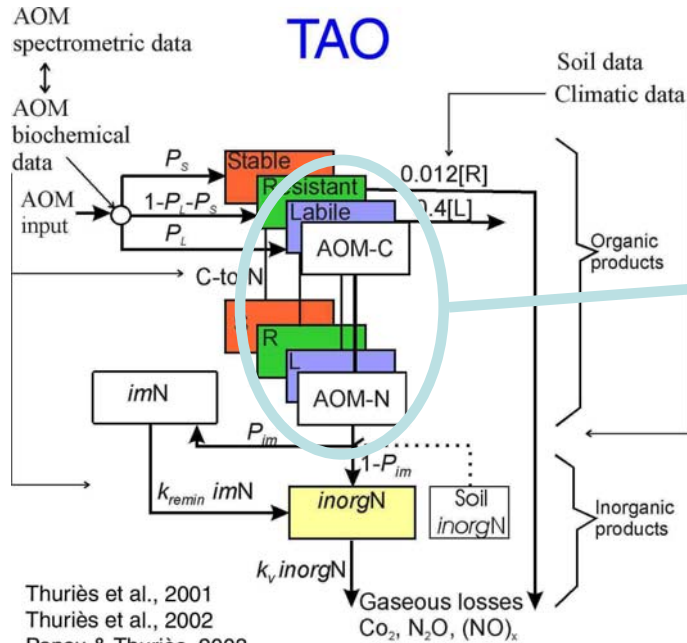
Potentiel d'humification et son expression



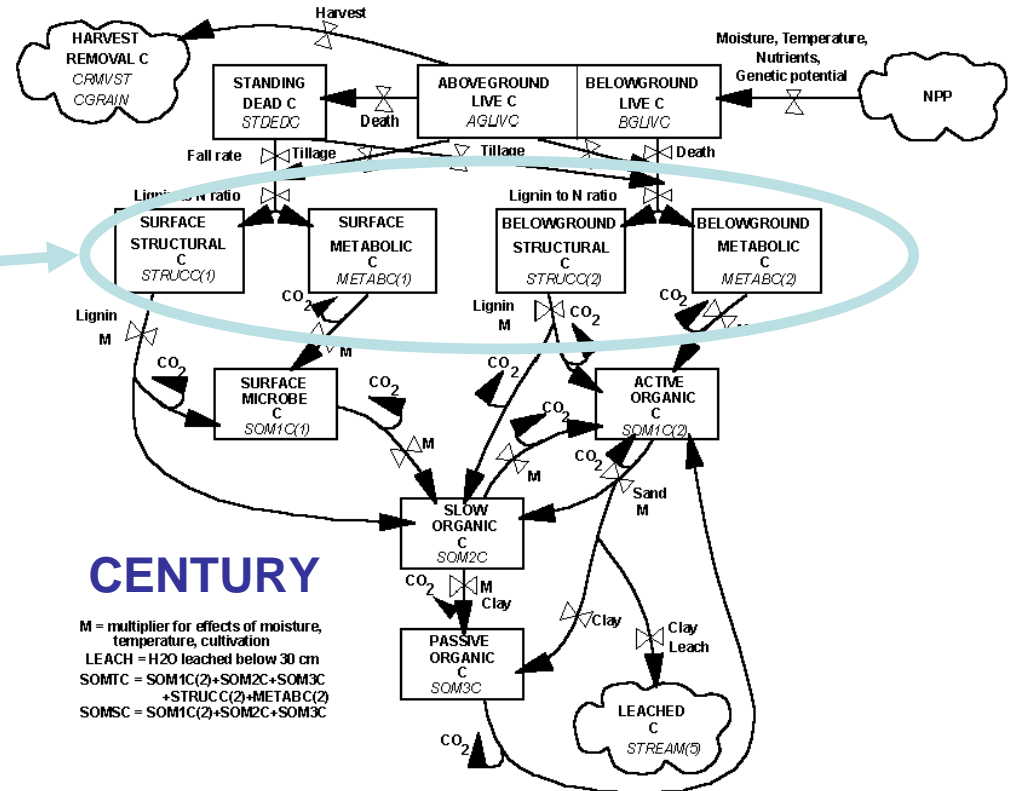
- AO à teneur en MO \equiv peuvent avoir des potentiels d'humification \neq
- La notion d'expression du potentiel est importante (Cf. compost urbain vs fumier)



Inclusion dans modèles 'intégrés' (ex. CENTURY)



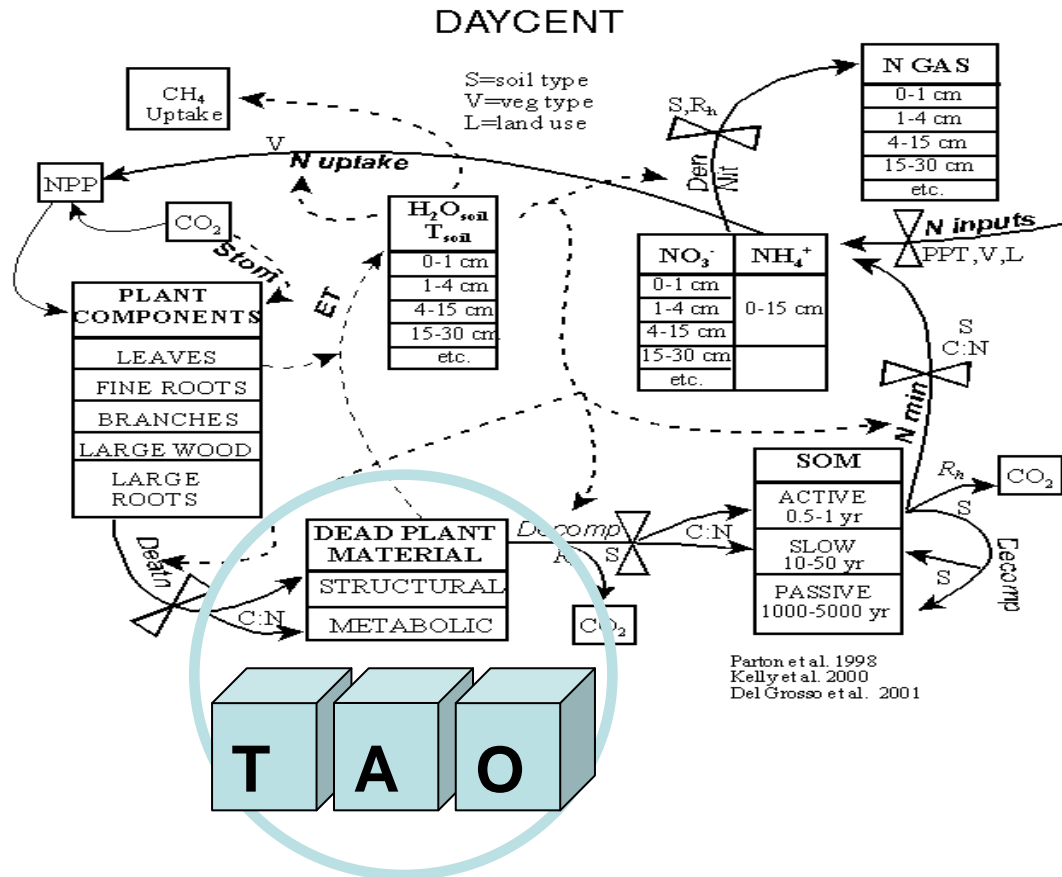
Thuriès et al., 2001
 Thuriès et al., 2002
 Pansu & Thuriès, 2003
 Pansu et al., 2003



Sous-modèle, module :

ex. décomposition litière mulch / flux H₂O
(PASTIS, STICS)

Insertion 'directe' = entrées des modèles MOS et
'complets sol/plante' (DAYCENT)





1583 mm

MERCI

