Compostage : Processus & moyens de contrôle

Impact environnemental

Jean-Marie Paillat
UPR CIRAD Recyclage et risques
UMR INRA/Agrocampus Sol Agro & hydro systèmes Spatialisation
65 rue de St Brieuc, cs84215
35042 RENNES Cedex 01

UMR Sol Agronomie Spatialisation

UpR Risque environnemental lié au recyclage

Plan

Introduction

Processus microbiologiques et physiques déterminant les émissions gazeuses

Facteurs de contrôle
Modélisation des émissions gazeuses

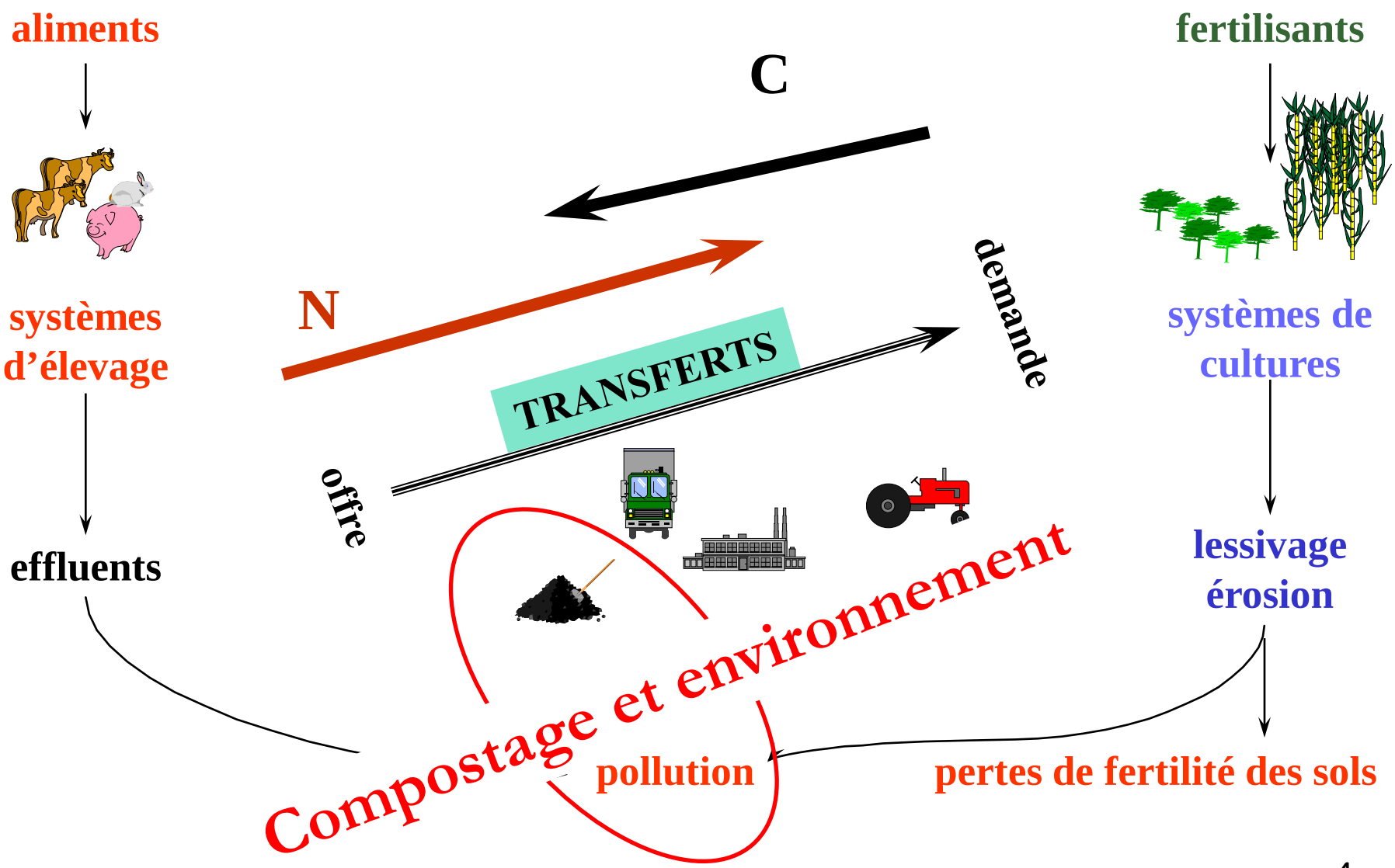
Introduction

Transferts de MO (Compost – Compostage)

Intérêts du compostage

Implications environnementales

Problématique du transfert de MO



Compost - compostage : définitions

Qu'est-ce que le compostage ?

Processus contrôlé de dégradation des constituants organiques d'origine végétale et animale

Succession de communautés microbiennes (bactéries, champignons), en condition aérobie (principalement), entraînant une montée en température

(Ménasseri, 2005, d'après Francou, 2003)

Qu'est-ce que le compost ?

Produit organique plus ou moins stabilisé

Stockage de N et C

Disponibilité de N à plus ou moins long terme

Manipulation aisée

Pas ou peu d'odeur

Hygiénisé si T°

Variable selon produits mis en fermentation

Variable selon la conduite du process

A définir en fonction des utilisations (engrais/amendement)

Intérêts du compostage

GESTION DE LA FERTILITE

Echelles :

- exploitation agricole (gestion individuelle)
- territoire à travers les réseaux d'échanges (transferts entre exploitations)

Intérêts du compostage attendus :

- amélioration de la gestion des effluents (réduction de la pollution des eaux)
- transferts de fertilité (efficacité agronomique)

STABILISATION DU CARBONE

Echelles :

- pays (intérêt de la France pour la gestion du CO_2 et autres gaz à effet de serre)
- planétaire (Kyoto)

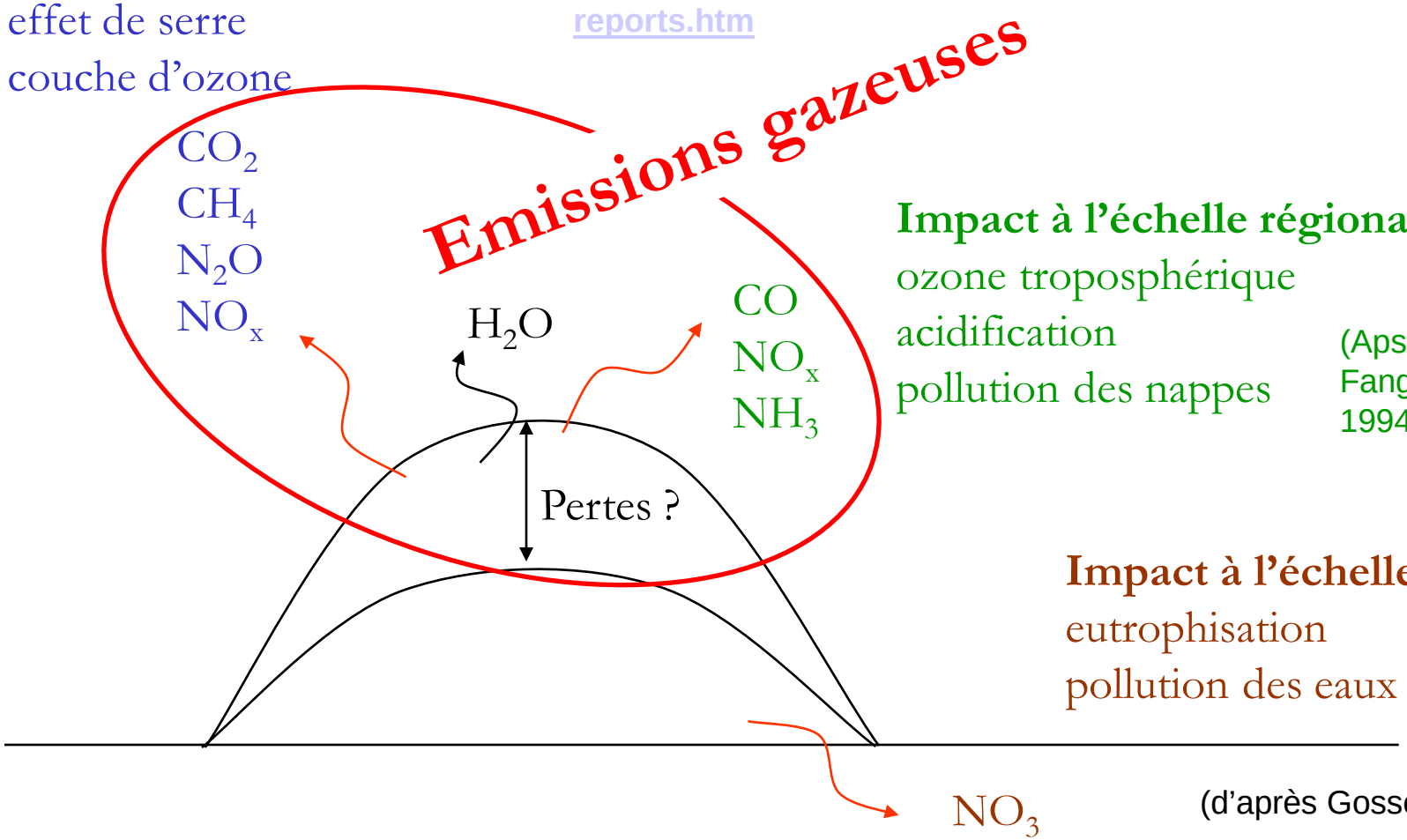
Intérêts du compostage attendus :

- immobilisation de carbone dans le sol (diminution de l'effet de serre)
- contribution à la gestion des effluents (réduction de la pollution atmosphérique)

Problème : transfert de pollution ?

Impact à l'échelle globale
effet de serre
couche d'ozone

(Kroese, 1994 ; Houghton et al., 2001)
http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm



Impact à l'échelle régionale :
ozone troposphérique
acidification
pollution des nappes

(Apsimon *et al.*, 1987
Fangmeier *et al.*, 1994)

Impact à l'échelle locale :
eutrophisation
pollution des eaux

(d'après Gosse et Mérillot, 1996)

(Morand, 2005)

Processus microbiologiques et physiques

Différentes phases

Transformation du carbone

Transformation de l'azote

Volatilisation

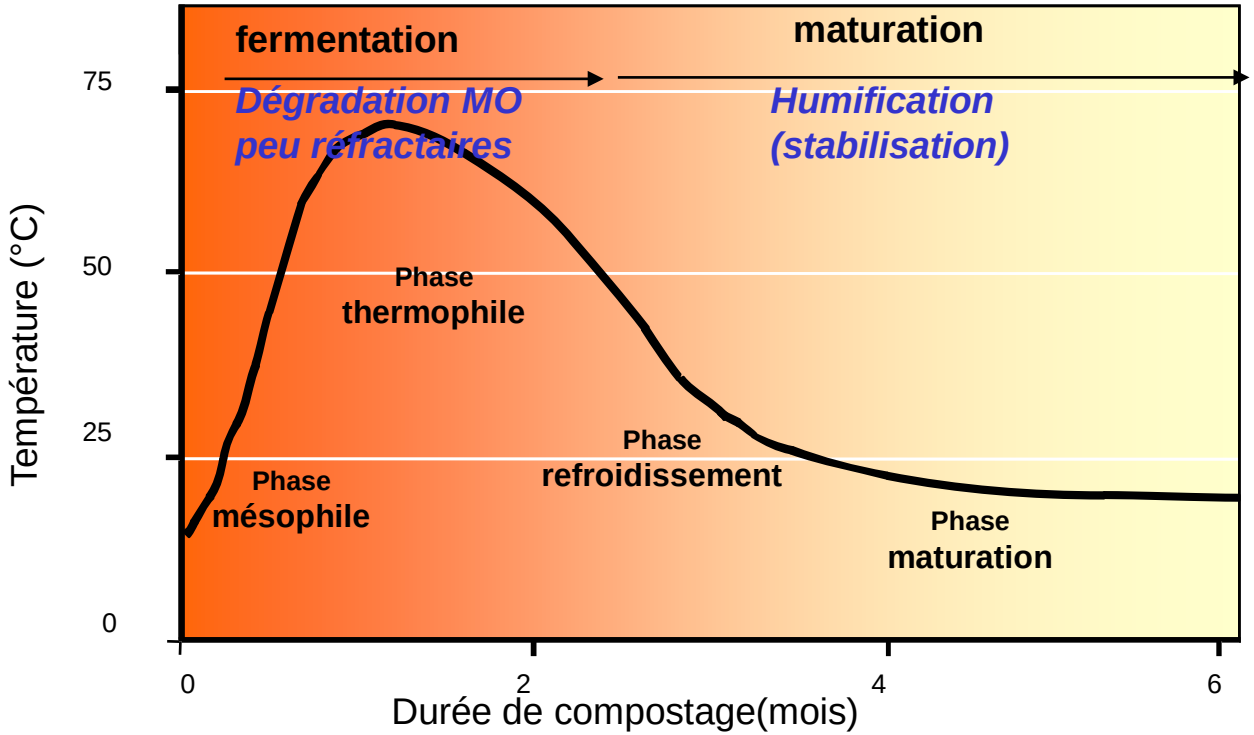
Différentes phases

DECHETS ORGANIQUES → COMPOST JEUNE PREHUMIFIE → COMPOST MUR RICHE EN HUMUS

Phase de décomposition
Dégradation de la matière organique fraîche dominante

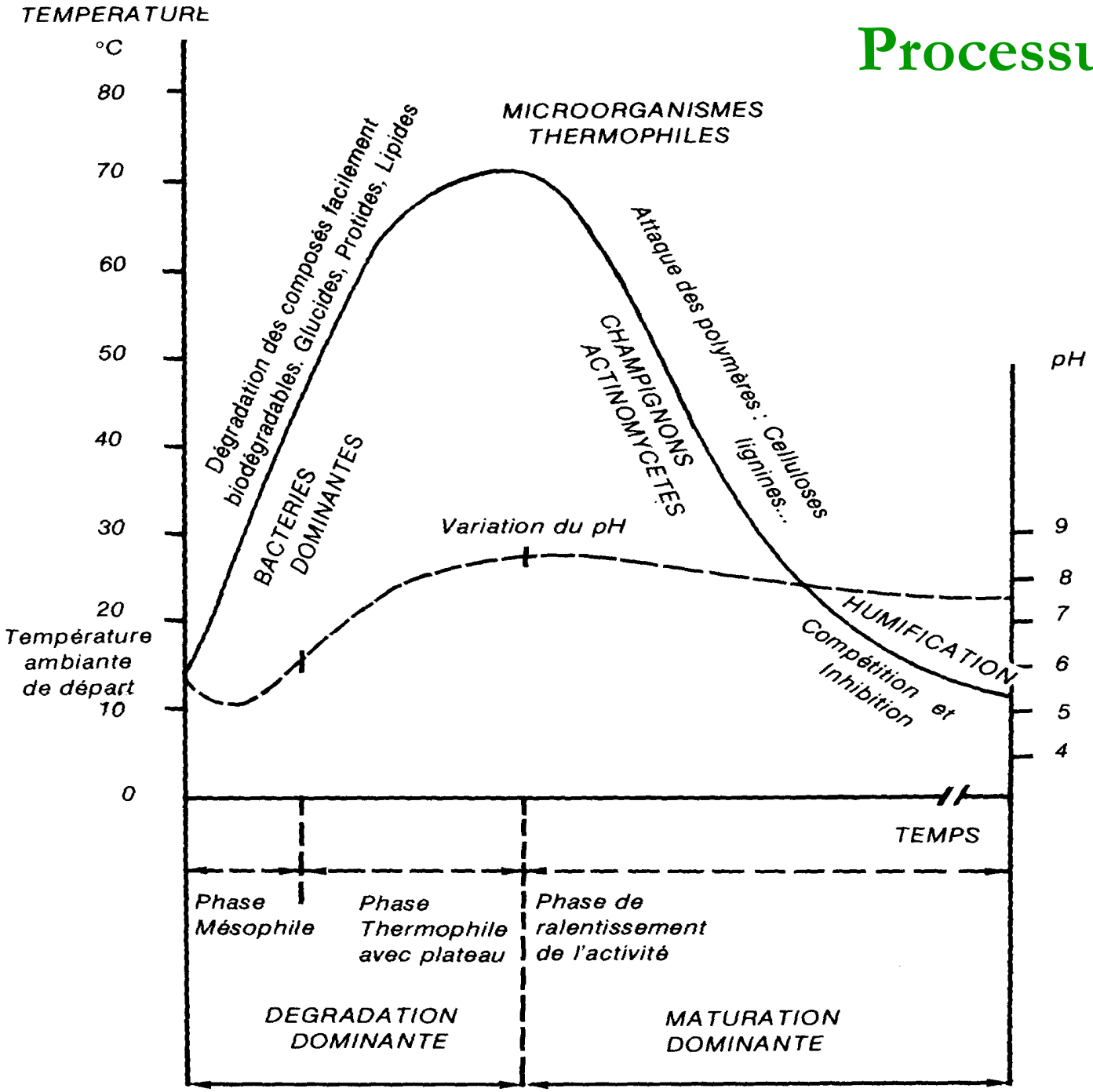
Phase de Maturation
Biosynthèse de composés humiques

(Mustin, 1987)



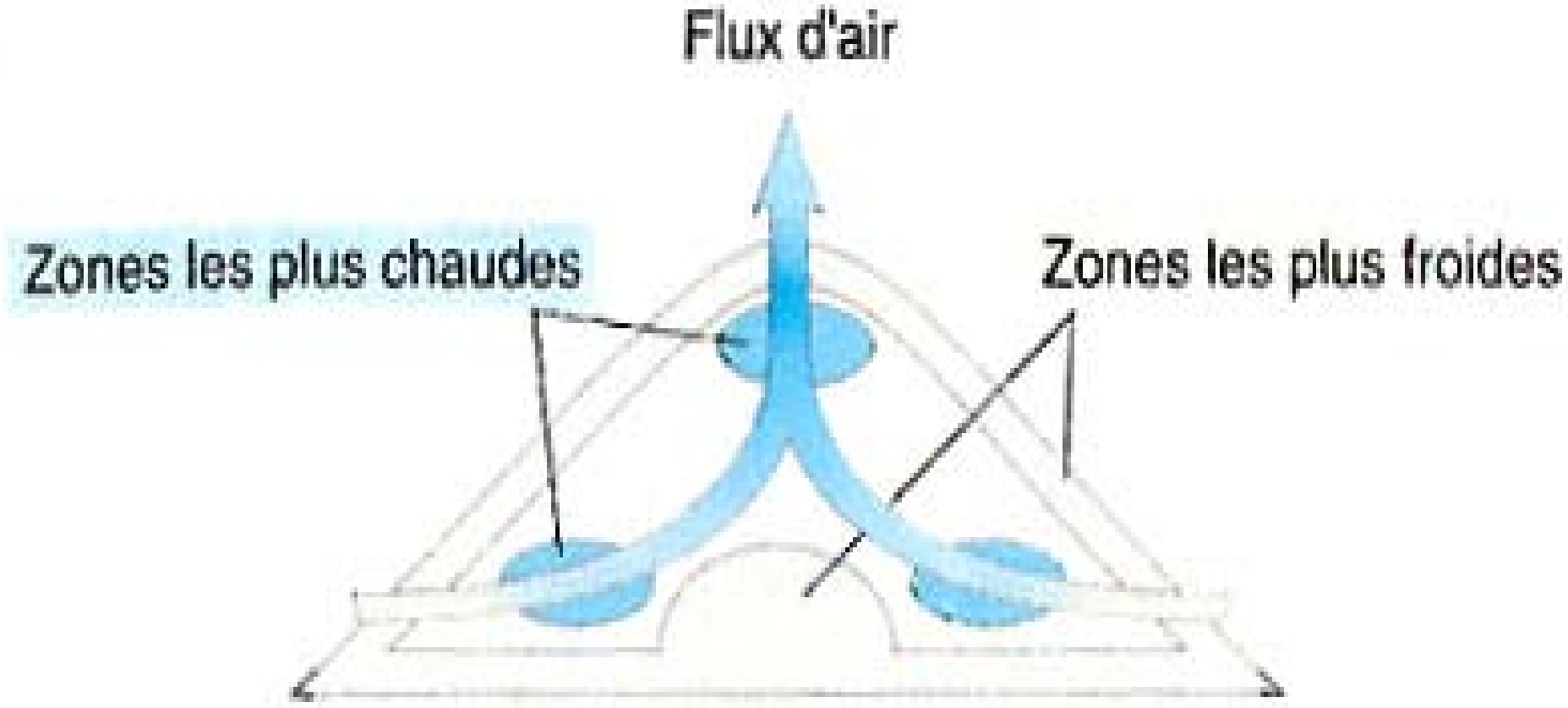
(Houot, 2005)

Processus microbiens



(Mustin, 1987)

Processus physiques



(Gobat *et al.*, 2003)

Transformation du carbone

Oxydation des composés carbonés facilement dégradables : (Mustin, 1987)

$CHON + O_2 \longrightarrow H_2O + CO_2 + NH_3 + \text{chaleur}$

$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6\,H_2O + 6\,CO_2 + 2834\ KJ/mole$

Méthanisation (anaérobies) :

$\longrightarrow 3\,CH_4 + 3\,CO_2 + 402\ KJ/mole$

Production d'acides organiques :

$\longrightarrow$ Glucides $\longrightarrow$ R-COOH $\longrightarrow$ $R\text{-}COO^- + H^+$

Attaques enzymatiques :

Amidon, hémicellulose, cellulose ... $\longrightarrow$ Glucides

Dissolution du CO_2 dans l'eau :

$CO_2 + 2\,H_2O \rightleftharpoons H\text{-}CO_3^- + H_3O^+$

$H\text{-}CO_3^- + H_2O \rightleftharpoons CO_3^{2-} + H_3O^+$

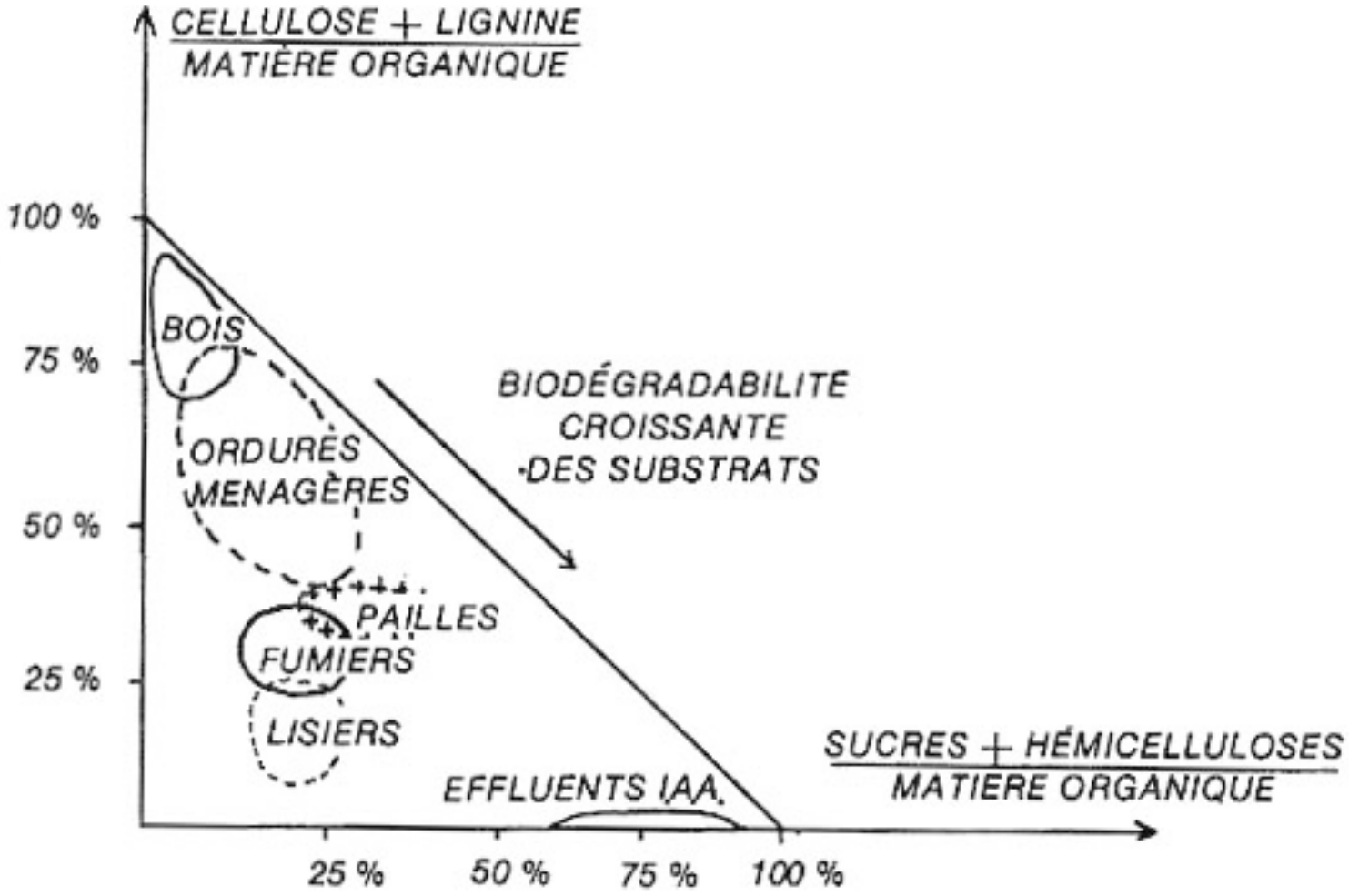
Eau métabolique

Emission de CO_2

Production de chaleur

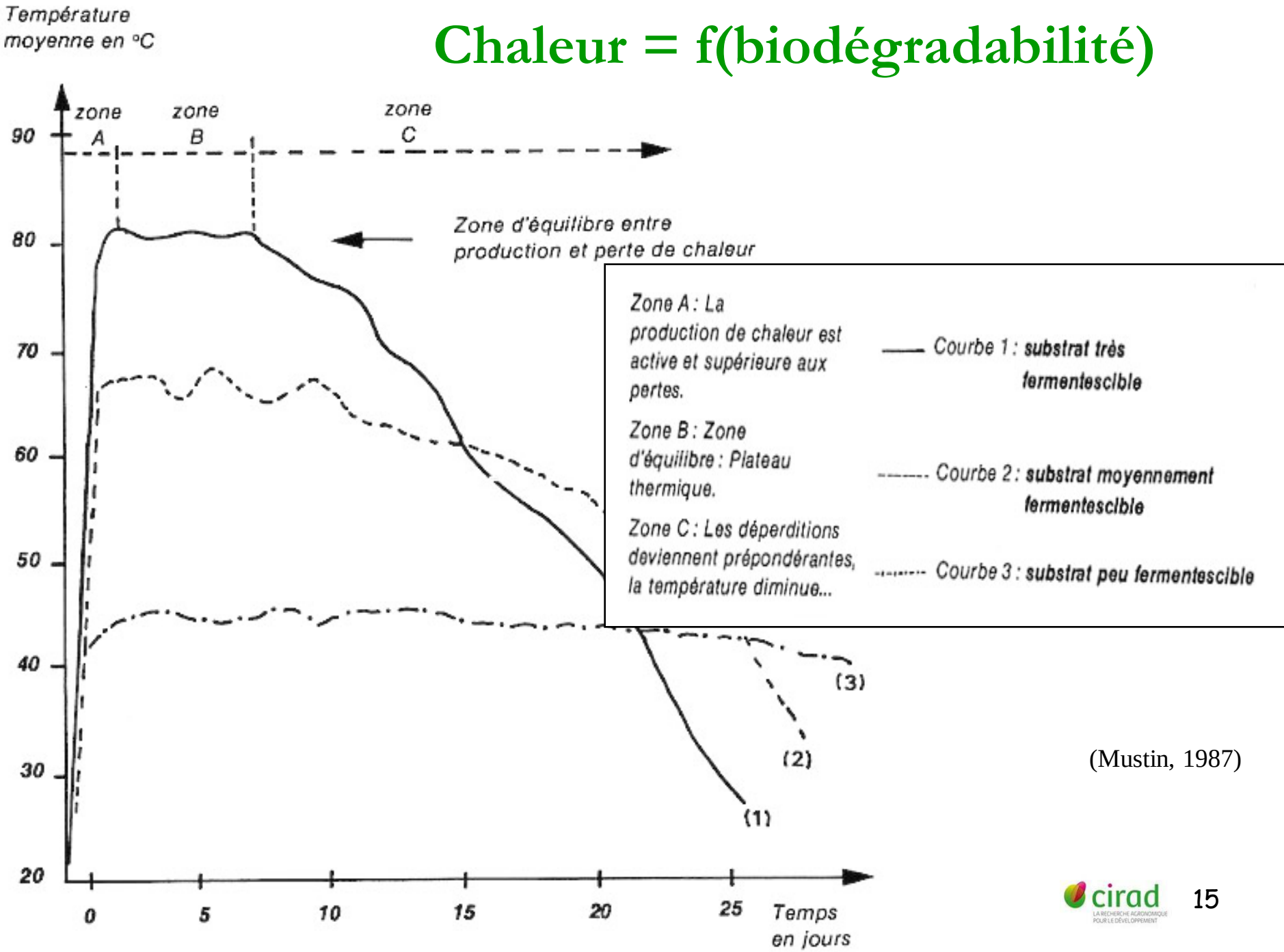
Acidification

Biodégradabilité du C



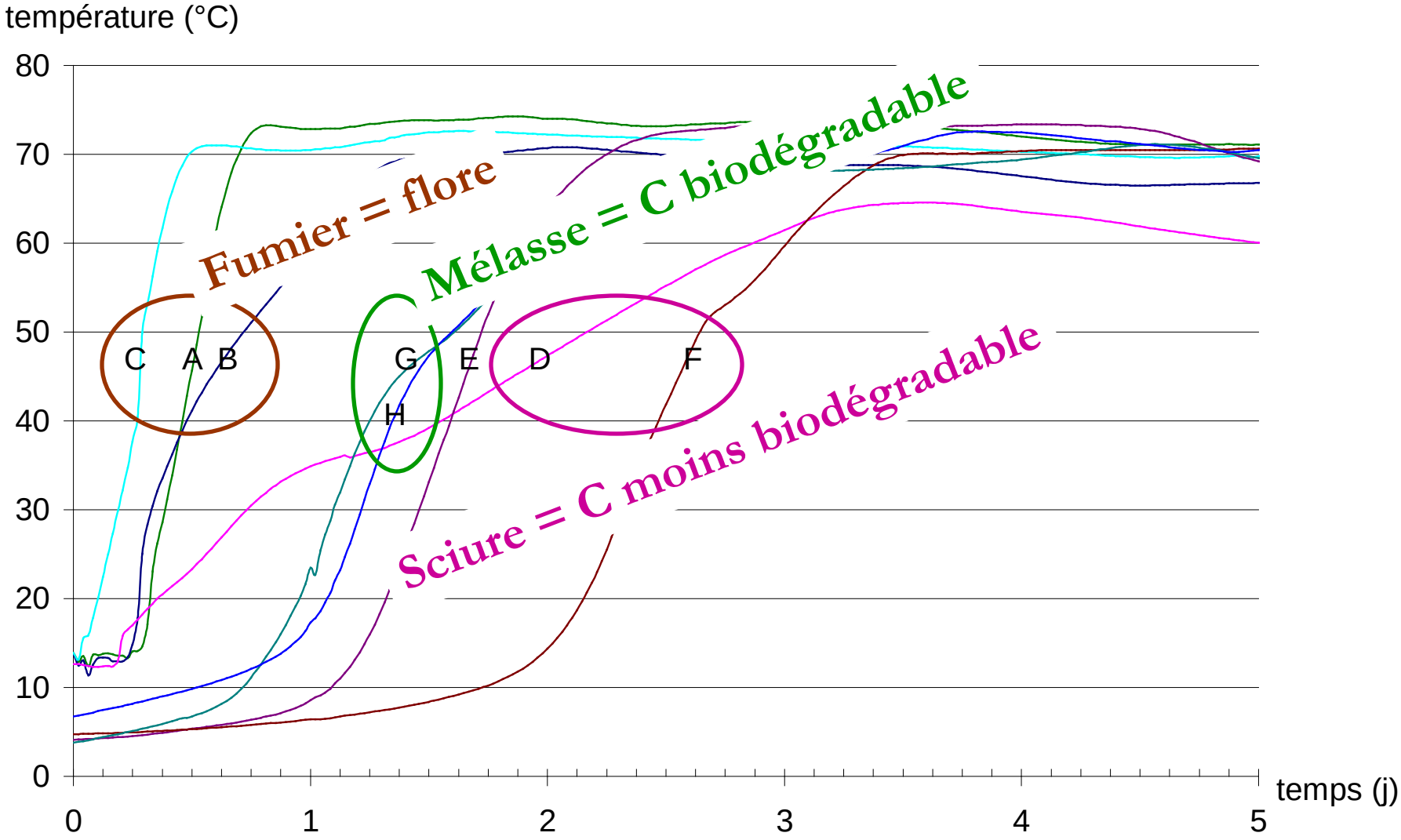
(Mustin, 1987)

Chaleur = f(biodégradabilité)



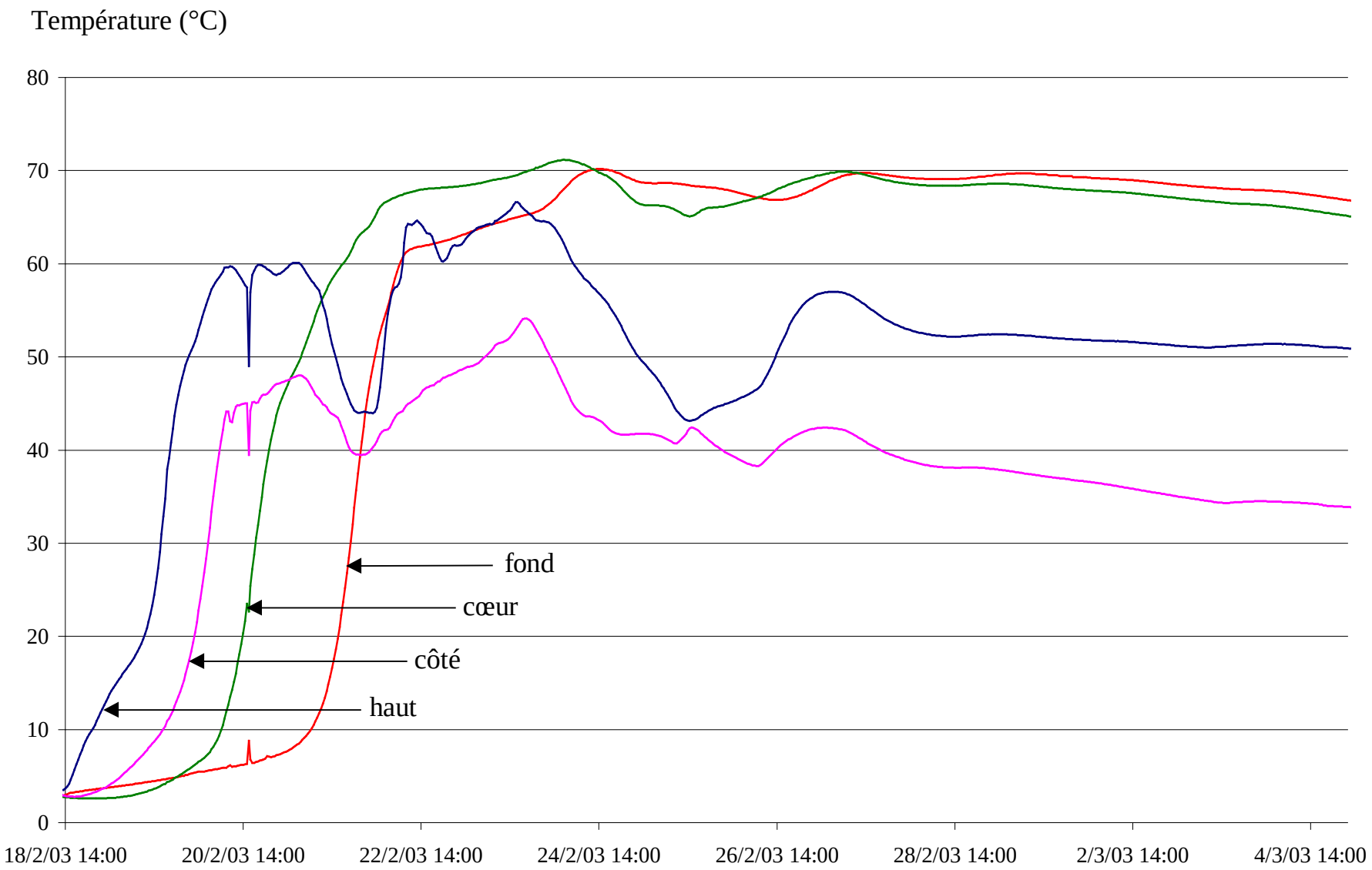
(Mustin, 1987)

Température = f(biodégradabilité et microflore)



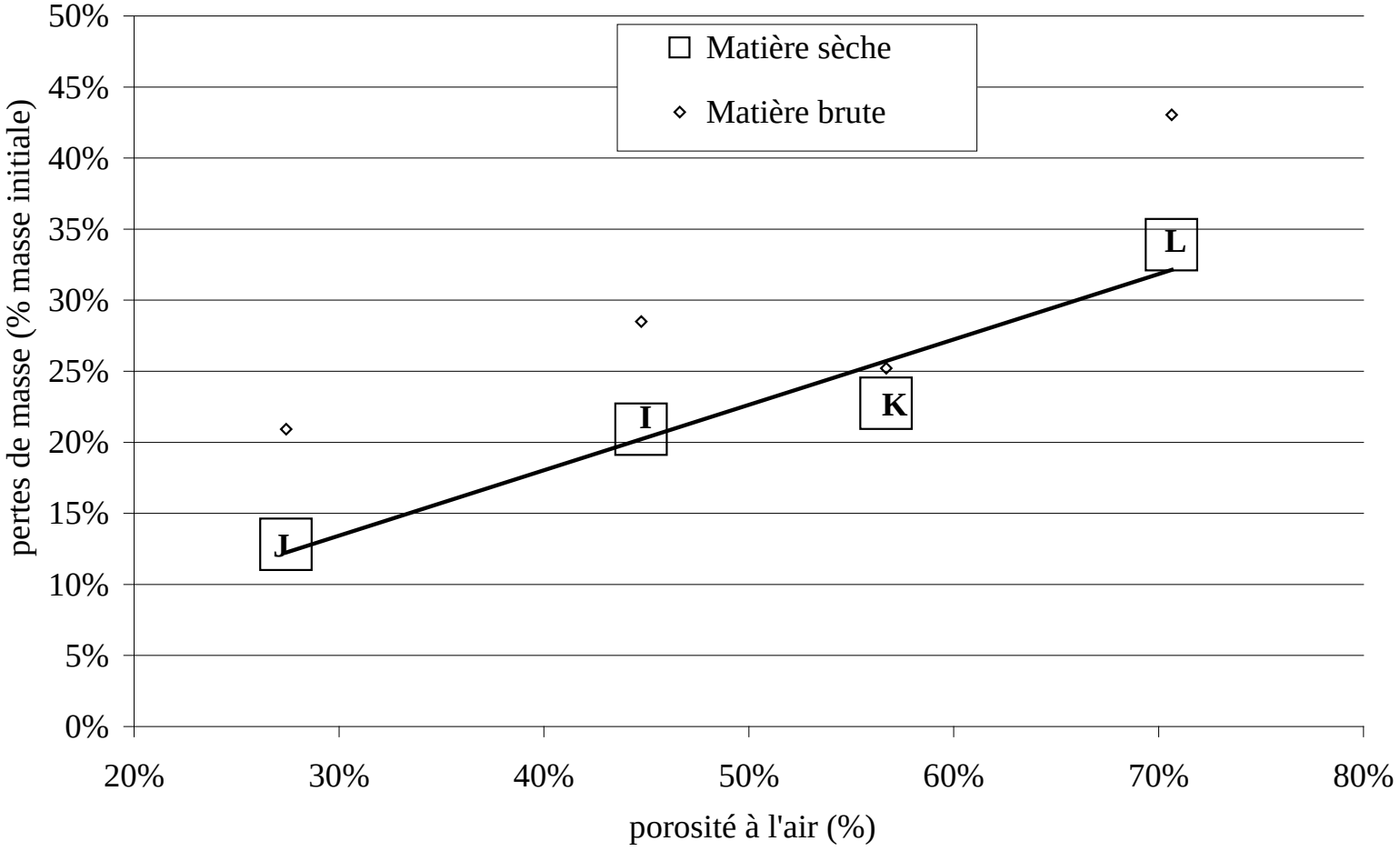
(Paillat *et al.*, 2005)

Température = f(porosité, convection)



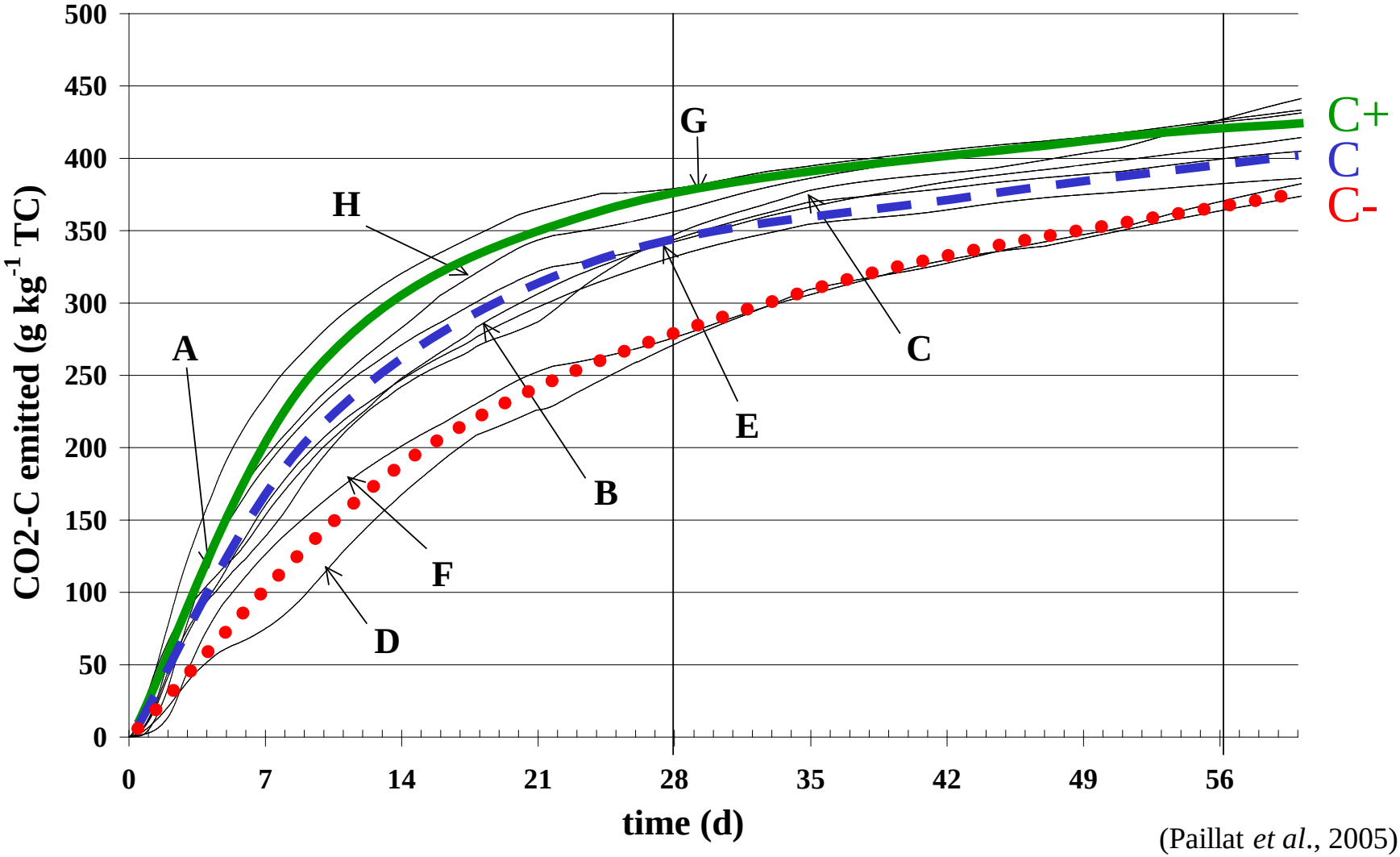
(Paillat *et al.*, 2005)

Pertes de MS = f(porosité, convection)



(Paillat *et al.*, 2005)

Emission de CO_2 = f(biodégradabilité C)



(Paillat *et al.*, 2005)

Transformation de l'azote

Ammonification des composés azotés : (Mancinelli, 1992 ; van Faasen, 1993; Morand, 2002)

$$R\text{-}NH_2 \longrightarrow NH_3 + H_2O \longrightarrow NH_4^+ + OH^-$$

Hydrolyse de l 'urée :

$$CO(NH_2)_2 + 3\ H_2O \longrightarrow CO_3^- + 2\ NH_4^+ + OH^-$$

Dégradation d[illegible] organique :

$$[illegible]_2 \longrightarrow H_2O + CO_2 + NH_3 + chaleur$$

Nitrification :

$$NH_4^+ + H^+ + [illegible] \rightarrow NH_2OH + H_2O \longrightarrow [illegible]$$

$$NO[illegible] \longrightarrow NO_3^- \qquad \longrightarrow N_2O$$

[illegible] :

$$2\ NO_3^- \longrightarrow 2\ NO_2^- \longrightarrow 2\ NO \longrightarrow N_2O \longrightarrow N_2$$

Immobilisation :

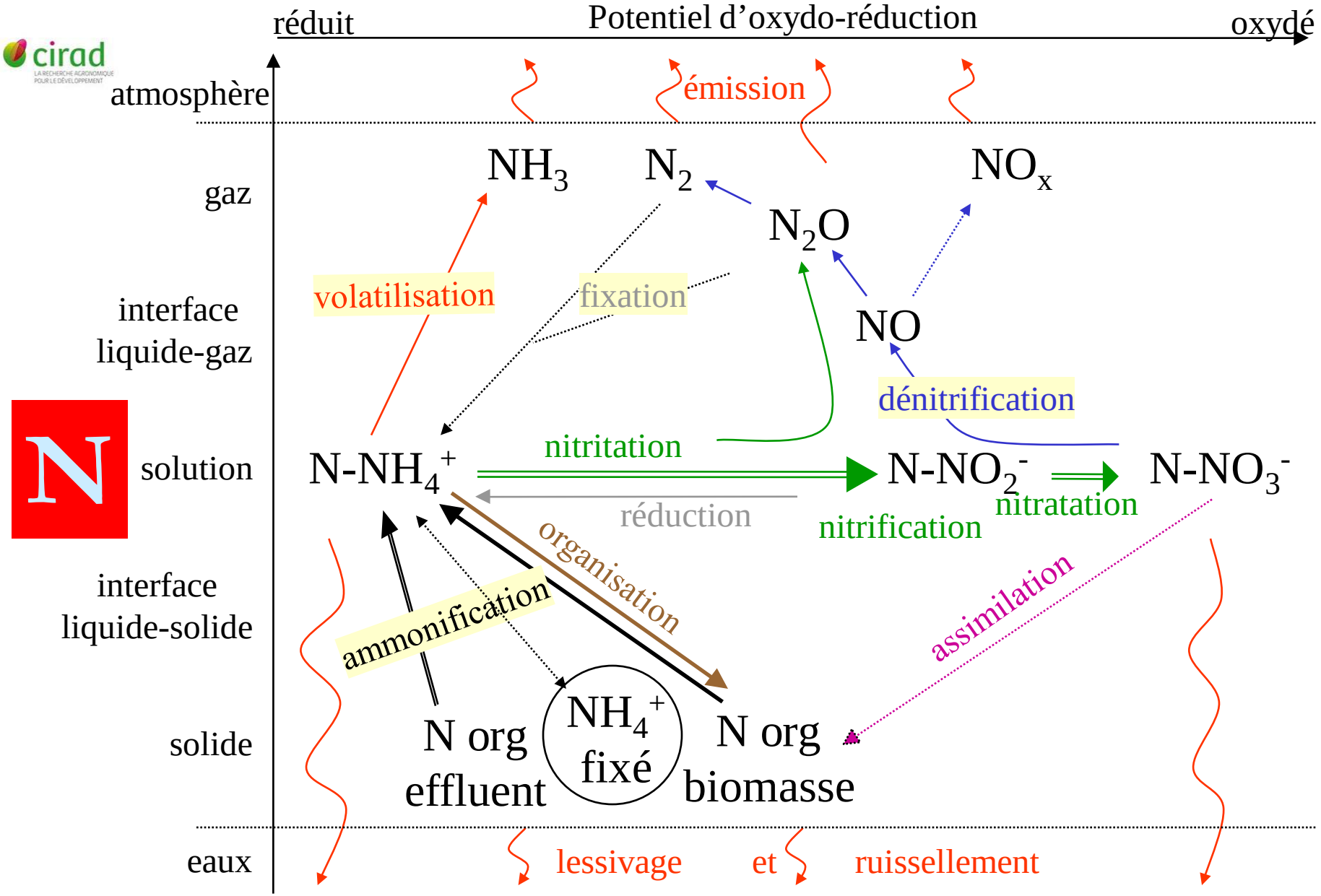
$$CH_2O + N\text{-}NH_4 \longrightarrow \text{cellules} + \text{humus}$$

Production d'ammonium

Alcalinisation

Production de nitrate

Production de N_2O et N_2


réduit
Potentiel d'oxydo-réduction
oxydé
atmosphère
émission
gaz
NH_3
N_2
NO_x
N_2O
interface liquide-gaz
volatilisation
fixation
NO
dénitrification
solution
$N\text{-}NH_4^+$
nitritation
$N\text{-}NO_2^-$
$N\text{-}NO_3^-$
réduction
nitrification
nitratation
interface liquide-solide
organisation
ammonification
assimilation
solide
N org effluent
NH_4^+ fixé
N org biomasse
eaux
lessivage
et
ruissellement

Processus de volatilisation

(Génermont, 1996)

$$NH_4^+ + H_2O \xrightleftharpoons{K_{AN}} NH_3aq + H_3O^+$$

$$H\text{-}CO_3^- + H_3O^+ \xrightleftharpoons{K_{AC1}} CO_2 + 2\,H_2O$$

$$CO_3^{2-} + H_3O^+ \xrightleftharpoons{K_{AC2}} H\text{-}CO_3^- + H_2O$$

$$NH_4^+ + CO_3^{2-} \rightleftharpoons NH_3aq + HCO_3^-$$

$$NH_4^+ + HCO_3^- \rightleftharpoons NH_3aq + CO_2aq + H_2O$$

solution		Interface liquide-gaz		atmosphère		
NH_3aq	$\xrightleftharpoons{K_{HN}}$	NH_3g	$\xrightleftharpoons{K_V}$	NH_3a	$\Rightarrow$	**pH** $\downarrow$
CO_2aq	$\rightleftharpoons$	CO_2g	$\rightleftharpoons$	CO_2a	$\Rightarrow$	**pH** $\uparrow$
H_2Oaq	$\rightleftharpoons$	H_2Og	$\rightleftharpoons$	H_2Oa		

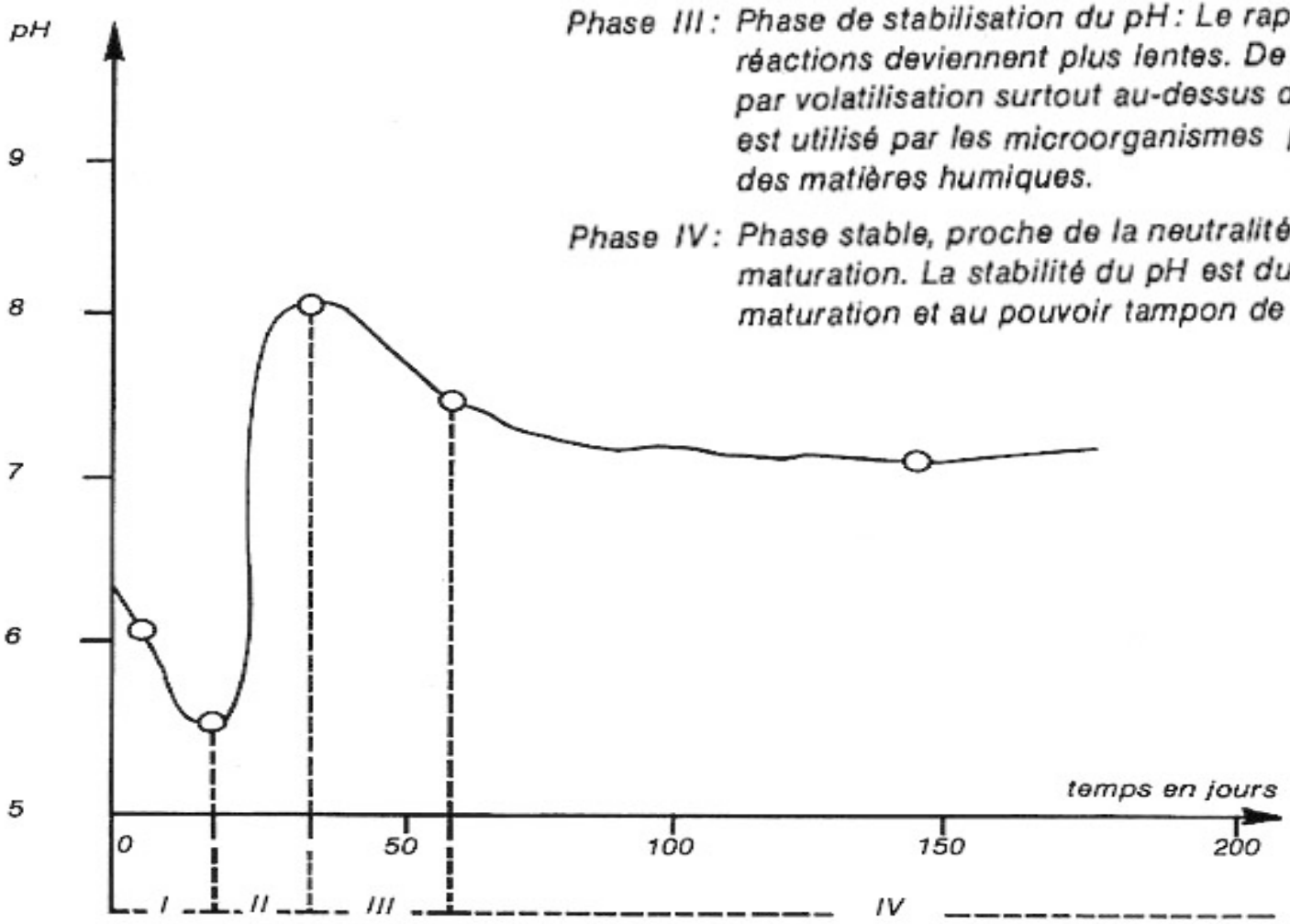
pH

Phase I : *Le pH diminue :*
Phase d'acidogénèse : Intense production de gaz carbonique et d'acides organiques en début de phase thermophile (dominance Flore mésophile)

Phase II : *Le pH augmente :*
Phase d'alcalinisation (Flore thermophile dominante) avec hydrolyse bactérienne de l'azote protéique et organique, productrice d'ammoniac (base).

Phase III : *Phase de stabilisation du pH : Le rapport C/N a diminué, les réactions deviennent plus lentes. De l'ammoniac a été perdu par volatilisation surtout au-dessus de pH 8, et l'azote est utilisé par les microorganismes pour réaliser la biosynthèse des matières humiques.*

Phase IV : *Phase stable, proche de la neutralité : le compost est en voie de maturation. La stabilité du pH est due aux réactions lentes de maturation et au pouvoir tampon de l'humus.*



(Mustin, 1987)

Facteurs de contrôle - modélisation

Facteurs influençant les émissions

Etude des émissions gazeuses

Modélisation

Moyens d'action

Facteurs influençant les émissions d'azote

Emission de NH_3 :

Azote disponible : ↑⇒ ↑ NH_4^+

pH : ↑ ⇒ NH

Température : ↑ → NH_3aq

$NH_3aq \rightarrow NH_3g$

Convection : ↑ ⇒ NH3g → NH_3a

NH_3 ↑

Rapport C/N : ↑ ⇒ immobilisation

Carbone biodégradable : ↑ ation NH_4^+

O_2 + T<45°C ⇒ ↑

NH_3 ↓

?

N disponible

C biodégradable

Emissio N_2O :

porosité

humidité

on si C disponible + O_2 + T<45°C

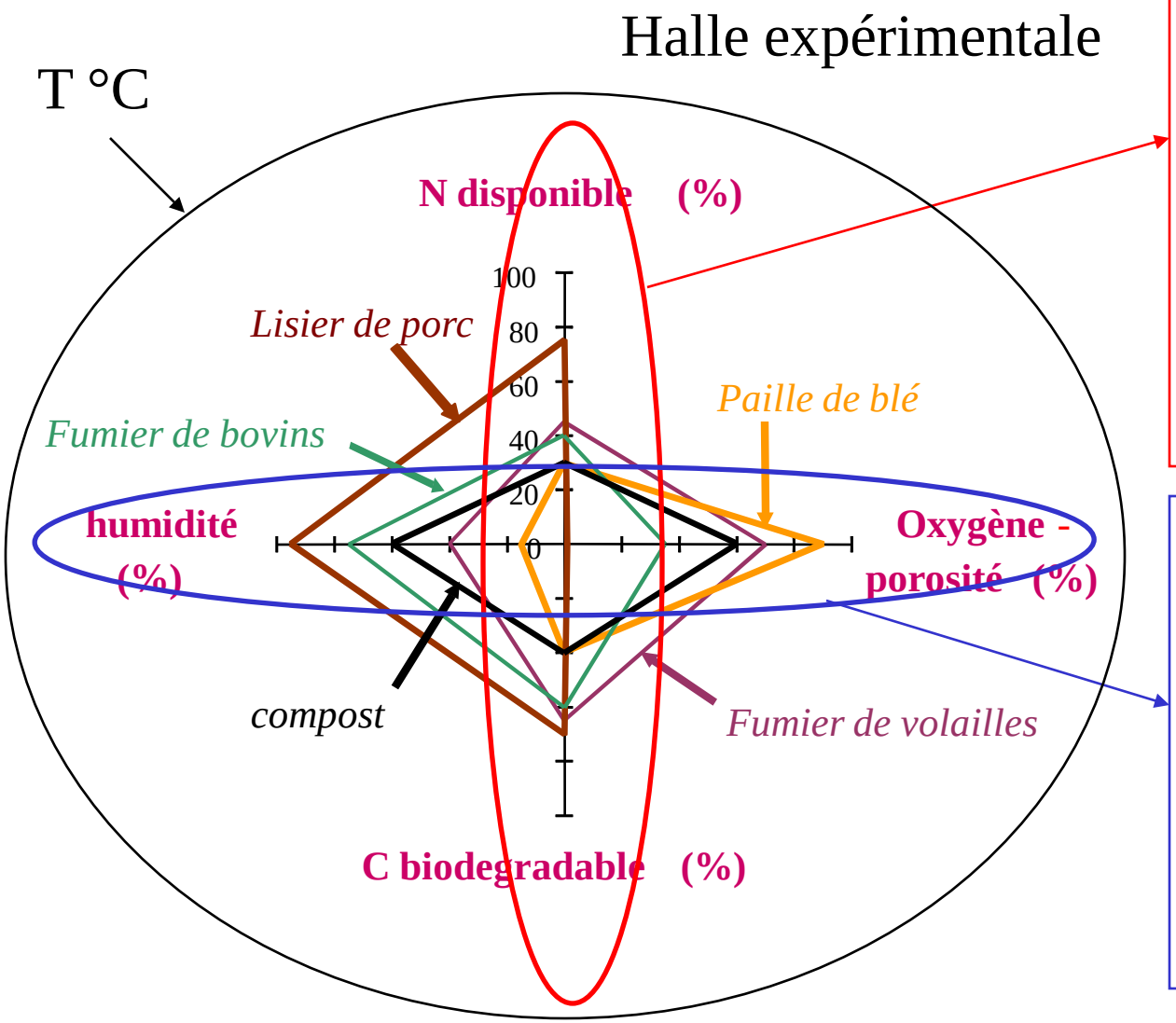
ternes) Si O_2 limitant

nitrification si C disponible + anoxie

(fond, agrégats) Si C limitant

N_2O ↑

Etude des émissions gazeuses



Expé 2 en 2002

lisier / fumier / paille
N disponible 0,54 à 0,87
C biodégradable 0,53 à 0,61

Expé 3 en 2003

lisier / paille / sciure
N disponible 0,66 à 0,76
C biodégradable 0,51 à 0,73

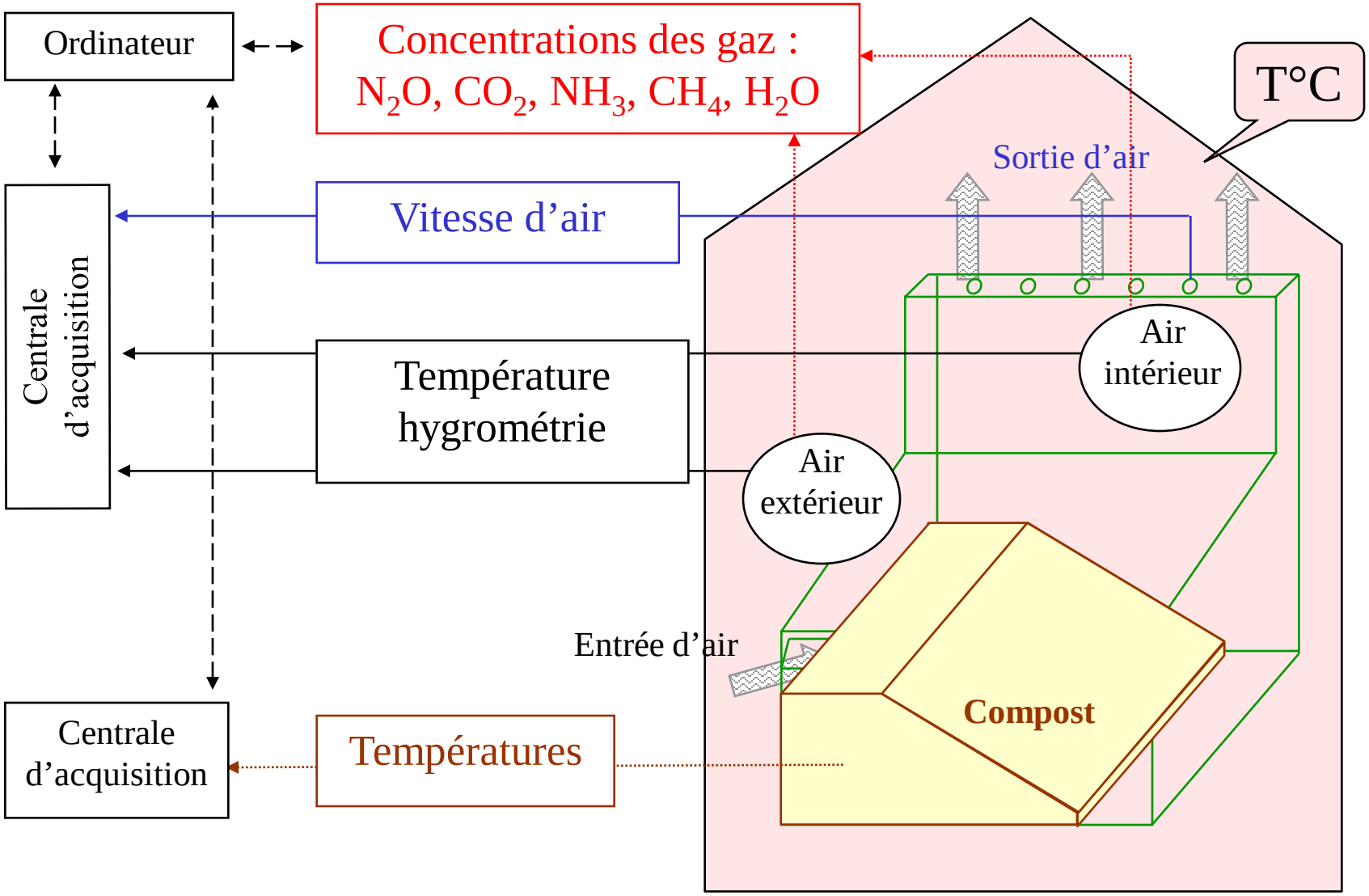
Expé 1 en 2002

fumier de volailles / eau
humidité 50 vs 70 %
porosité 0,25 à 0,70

Expé 4 en 2003

lisier / paille / sciure
humidité 50 à 82 %
porosité 0,51 à 0,70

Etude des émissions (halle expérimentale)



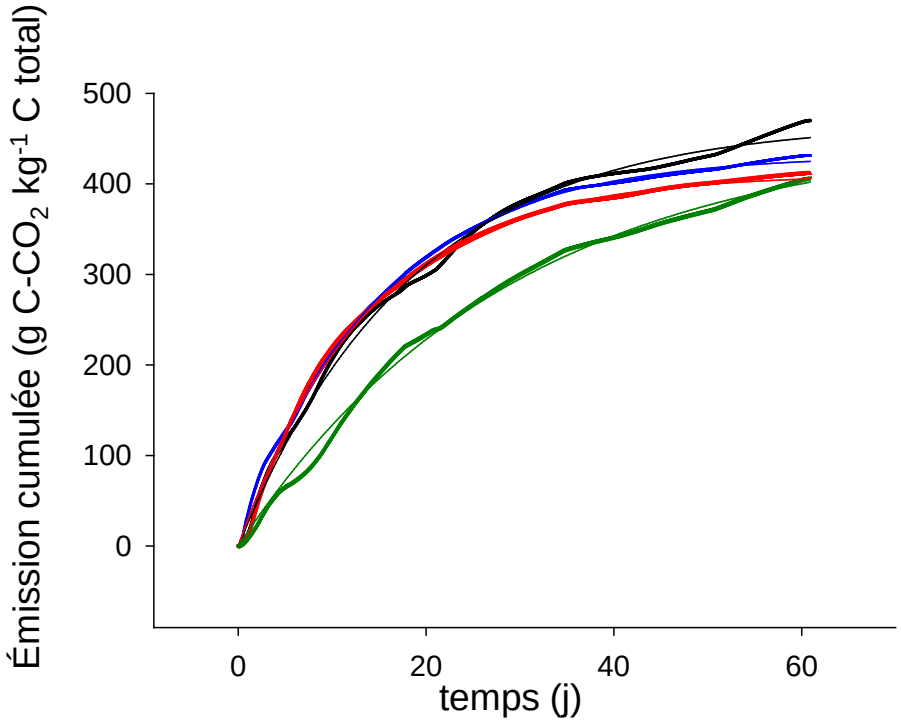
Modélisation (Ajustement mathématique)

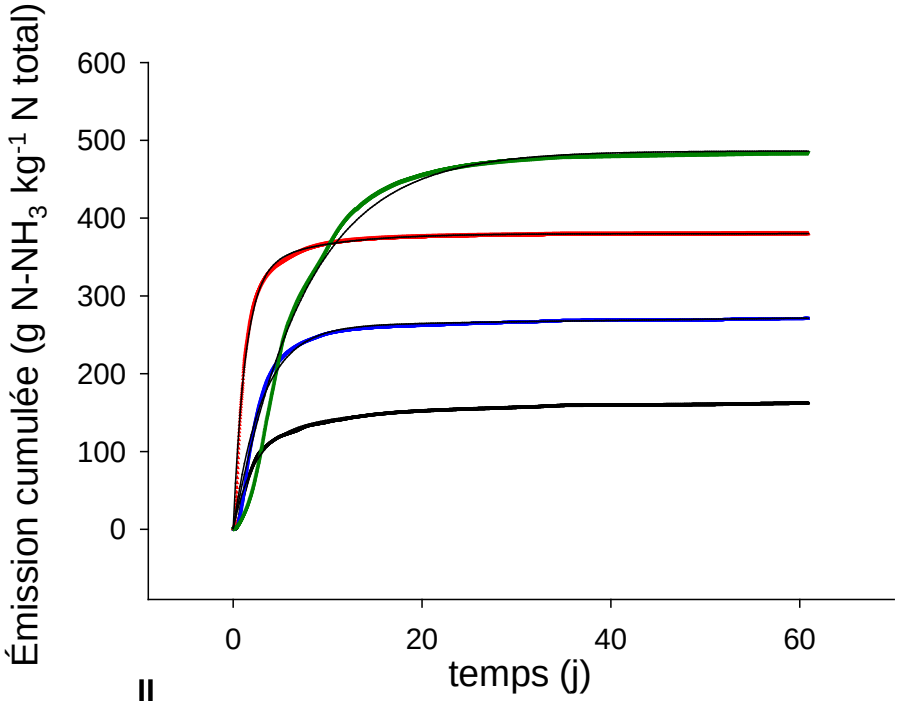
(Kirchmann and Witter,1989)

$$M = M_0 C_R \left(1 - e^{-k_R t}\right) + M_0 C_S \left(1 - e^{-k_S t}\right)$$

(Bernal and Kirchmann,1992)

$$M = M_0 C_R \left(1 - e^{-k_R t}\right) + M_0 C_S k_S t$$





4 paramètres à prédire pour N-NH_3 :

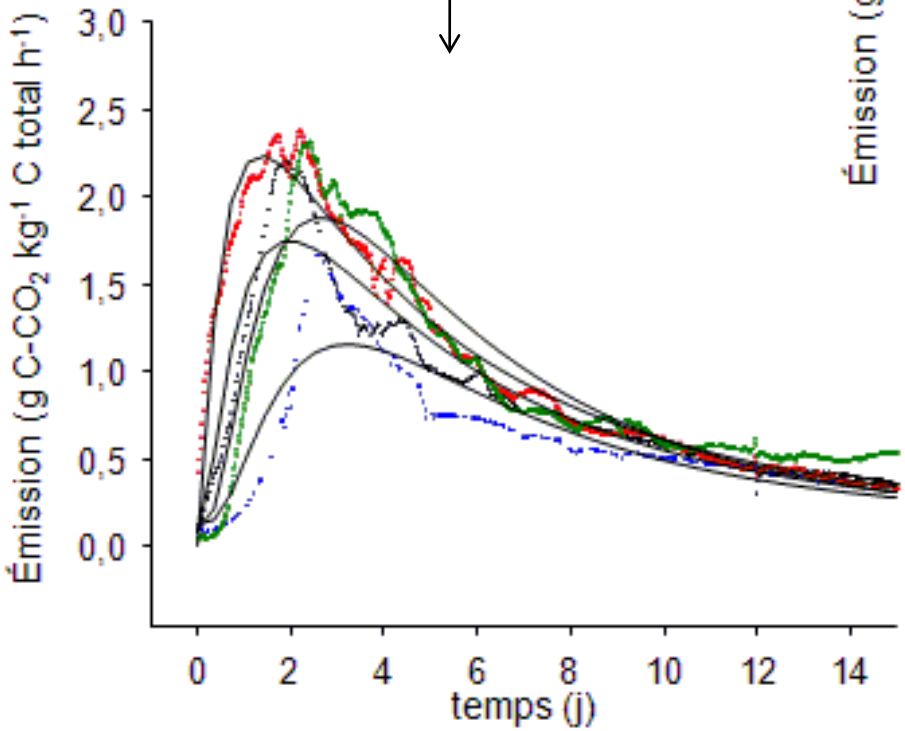
M_0C_R ; M_0C_S ; k_R ; k_S

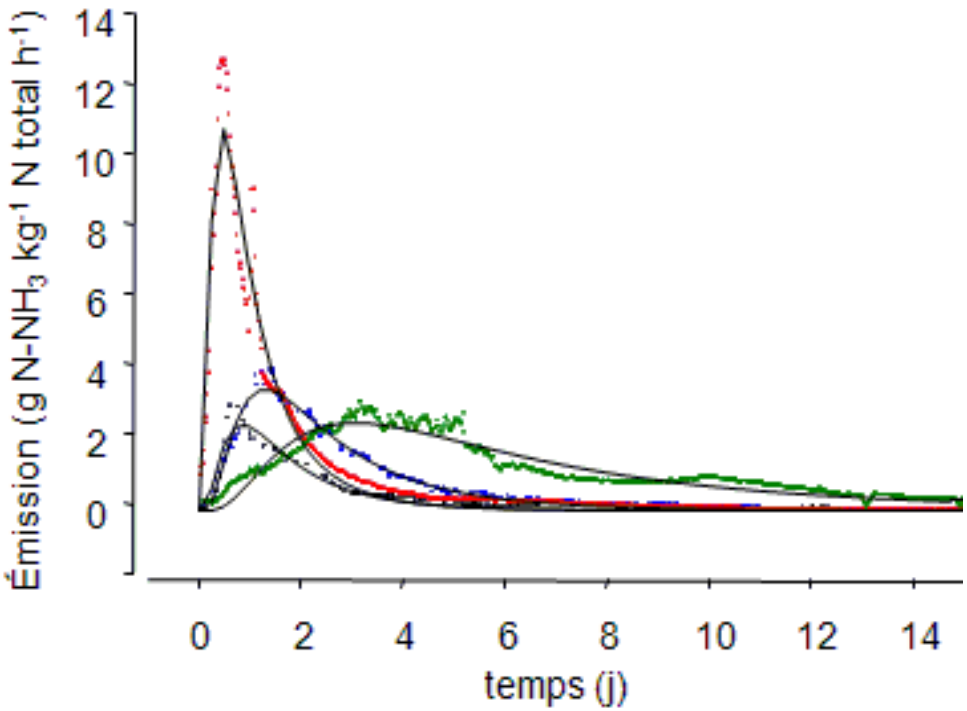
3 paramètres à prédire pour C-CO_2 et H_2O :

M_0C_R ; $M_0C_S k_S$; k_R

Modélisation (Ajustement mathématique)

$$y = y_0 + a \cdot e^{\left[-0,5\left(\frac{Ln\left(\frac{x}{x_0}\right)}{b}\right)\right]^2}$$





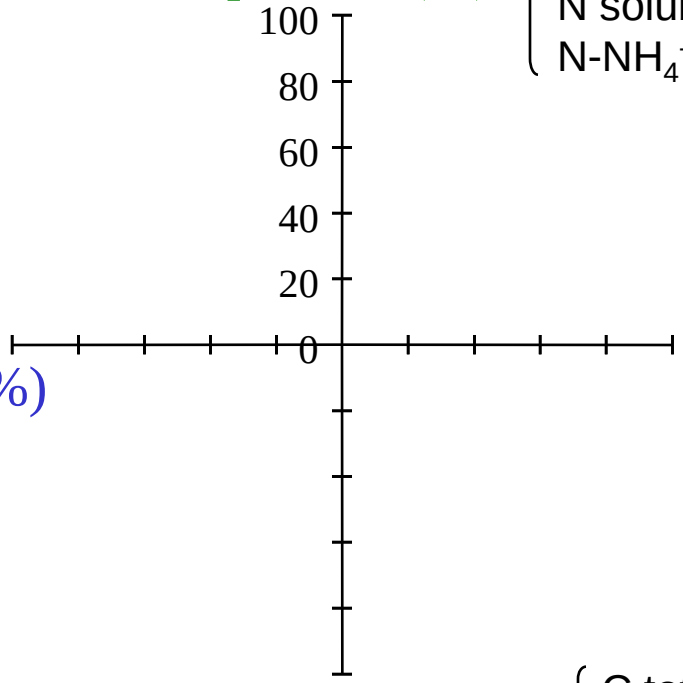
4 paramètres à prédire pour N-NH_3, C-CO_2 et H_2O :

y_0 ; x_0 ; a ; b

Modélisation (régression multiple)

Variables explicatives

N disponible (%)
- N total / MS
- N soluble / MS
- N soluble / N total
- N-NH_4^+ / N total



Humidité (%)
- MS
- Humidité
- Eau/MS
- MS/eau

Oxygène - porosité (%)
- Porosité air
- Densité MB
- Densité MS

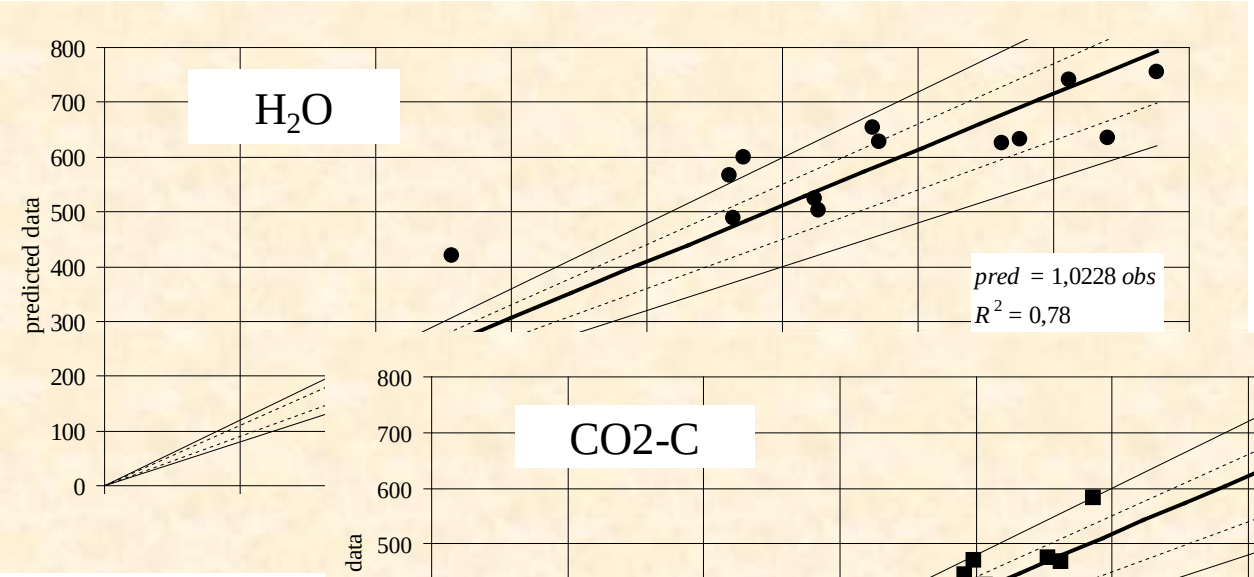
C biodegradable(%)
- C total / MS
- Soluble VS / MS
- (Hem + Cel VS) / MS

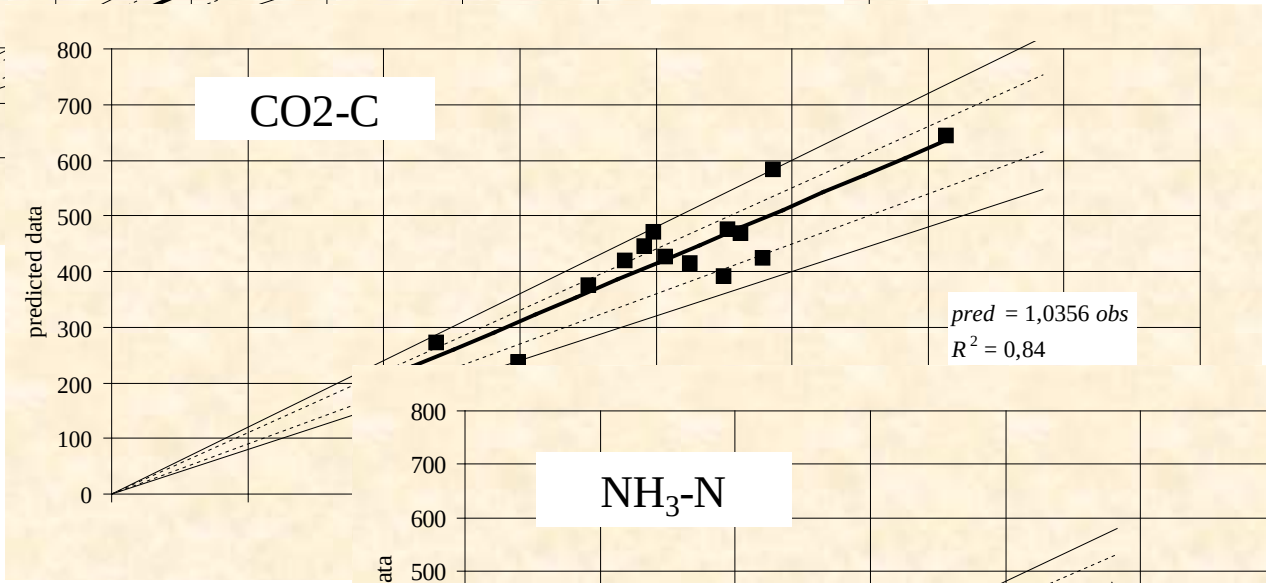
C/N
C sol VS / N soluble

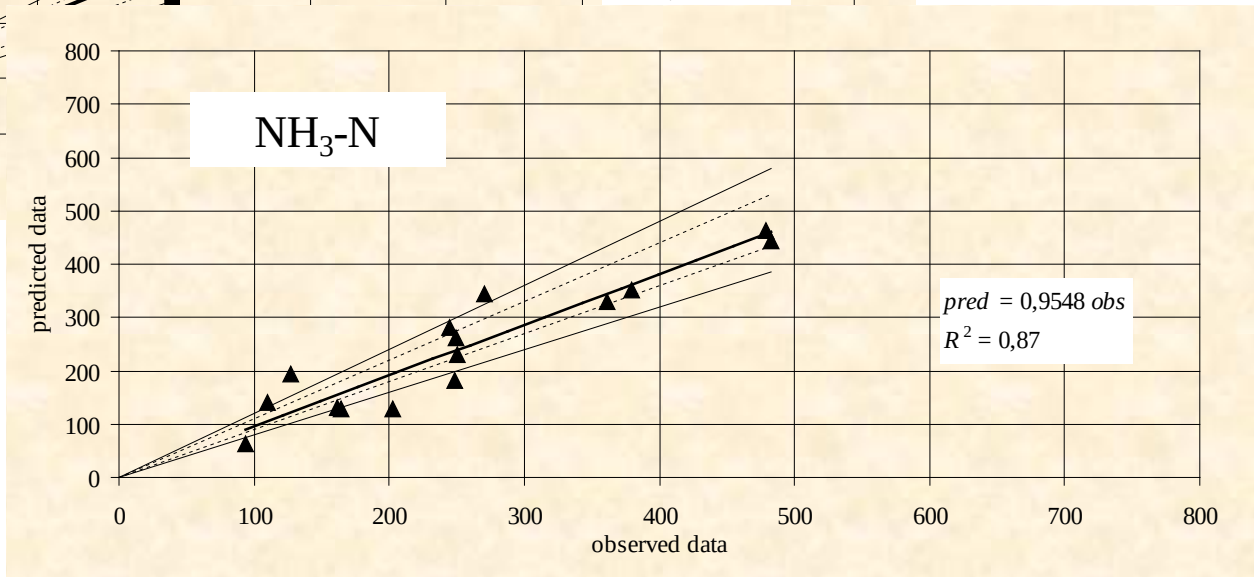
paramètre = f(N disponible, C biodégradable, humidité, porosité)

10 pour cinétiques cumulées
12 pour cinétiques instantanées

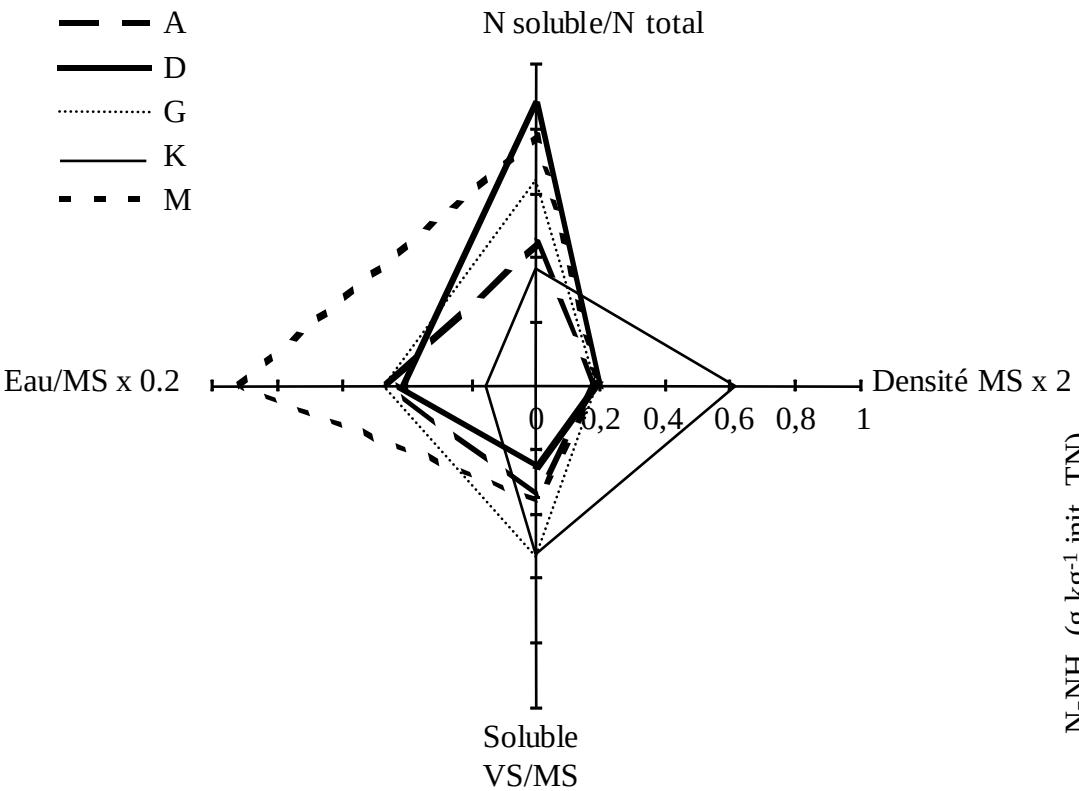
Modélisation (Prédiction des émissions)

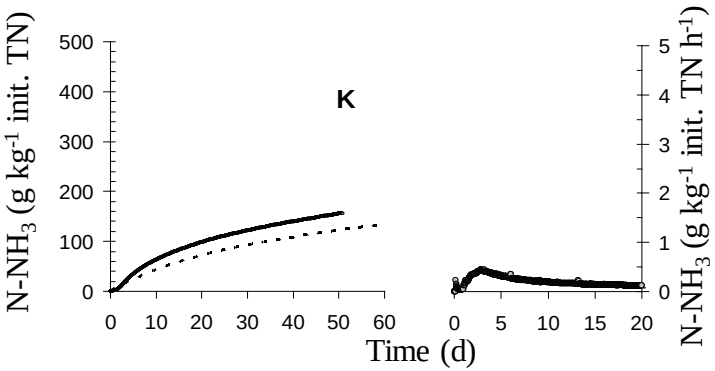


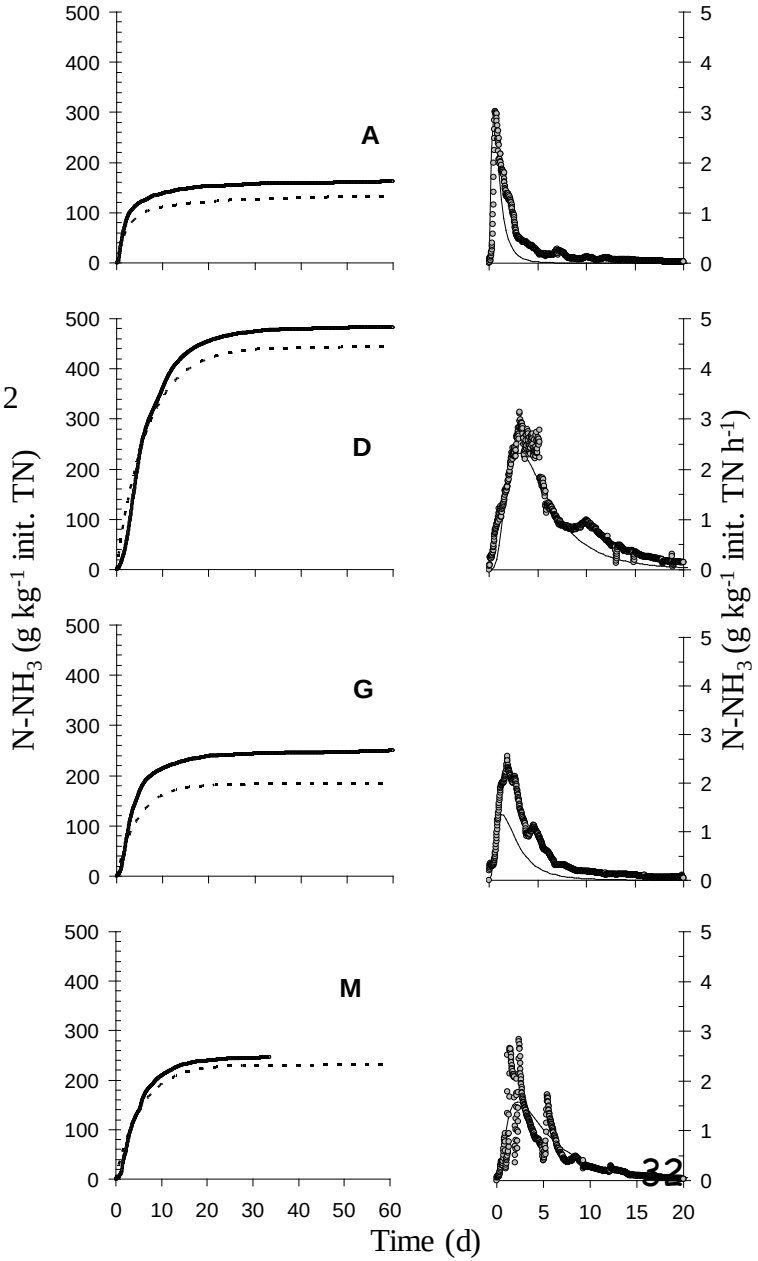




Modélisation (Prédiction des émissions)







Moyens d'action / situations types

Objectifs	Solutions – risques associés
Conservation N dans compost	Apport C : ↑ C/N, plutôt C biodégradable si C/N faible Si produit sec : ajout d'eau et tassement pour limiter NH_3 Si produit très humide : éviter le tassement
Elimination N (forme N_2)	Compostage en conditions très humides, C/N faible Maintenir une couche aérée en surface suffisante Risque d'émission de N_2O et CH_4 + absence d'hygiénisation
Conservation C, effet sur structure du sol	Tassement et apport d'eau suffisant Eviter retournement et réduire la durée de compostage
Conservation de l'eau	Tassement, éviter l'aération (soufflage, retournement)
Elimination d'eau	Apport de C biodégradable et retournements suivis de tassement si C/N faible pour limiter NH_3 Risque d'émission de N_2O

4000
lebouleh
AFP
menart
MERCI