



## ➤ Traitement et valorisation des déchets organiques par compostage et méthanisation

• 28/01/2025

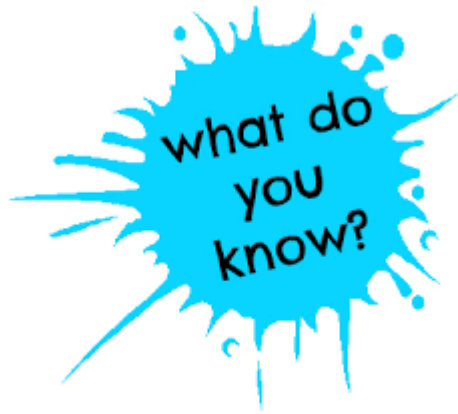
Anne Trémier

## ➤ Objectifs du cours

- Acquérir une connaissance générale des modes de traitement et de leurs applications :
  - Principes généraux
  - Principales technologies
- Comprendre les grands processus qui fondent les deux procédés biologiques
- Un cours interactif, si vous le voulez...



= A vous de jouer !



## Que connaissez vous du compostage et de la méthanisation?

- Différences et définitions ?



## ➤ Le compostage

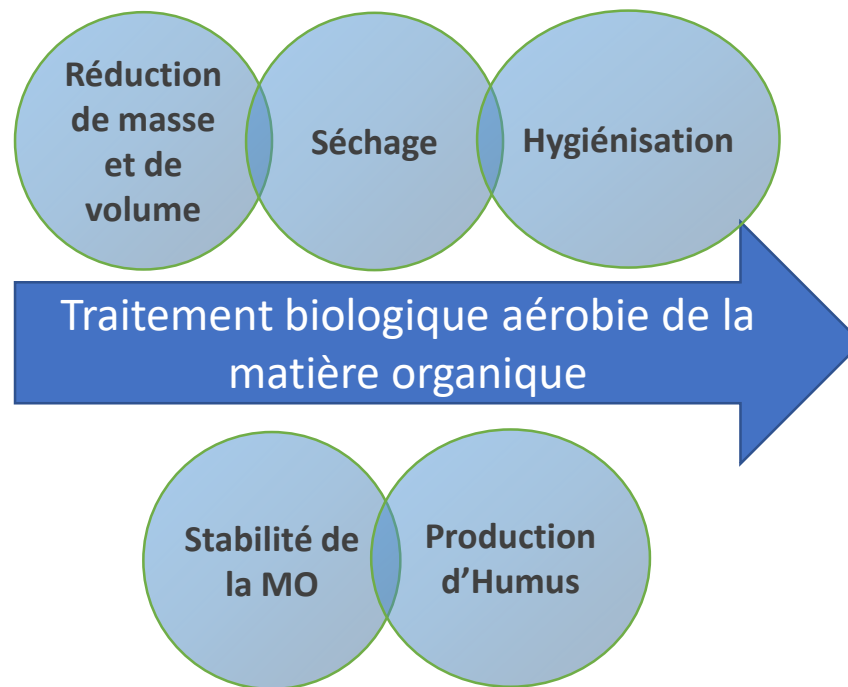
un procédé de transformation  
plus complexe qu'il n'y paraît



## ➤ Déchets organiques et compostage



Déchets



Compost



Qu'est ce que vous savez des technologies de compostage ?



## ➤ Pas une, mais plusieurs technologies

Un traitement modulable, **du très rustique au très sophistiqué** ... = exemples à différentes échelles



## ➤ Compostage individuel



### Déchets

Résidus alimentaires  
Déchets de jardin  
Papier et carton

### Objectifs

Un amendement  
organique pour le potager

### Technologies

Brouette, fourche, tamis



## ➤ Vermicompostage

- Compostage utilisant des vers : le plus connu = *Eisenia Fetida*
- Utilisé partout dans le monde pour le traitement de déchets divers.



# > Vermicompostage

A l'échelle individuelle

## Déchets

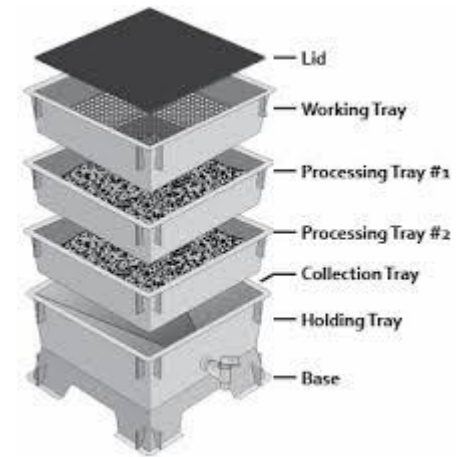
Principalement  
déchets  
alimentaires

## Objectifs

Un amendement  
Thé de compost

## Technologies

Vers  
Composteur multi-  
étage



A l'échelle industrielle

## Déchets

Déchets alimentaires  
Fumiers

## Objectifs

Support de culture pour  
horticulture

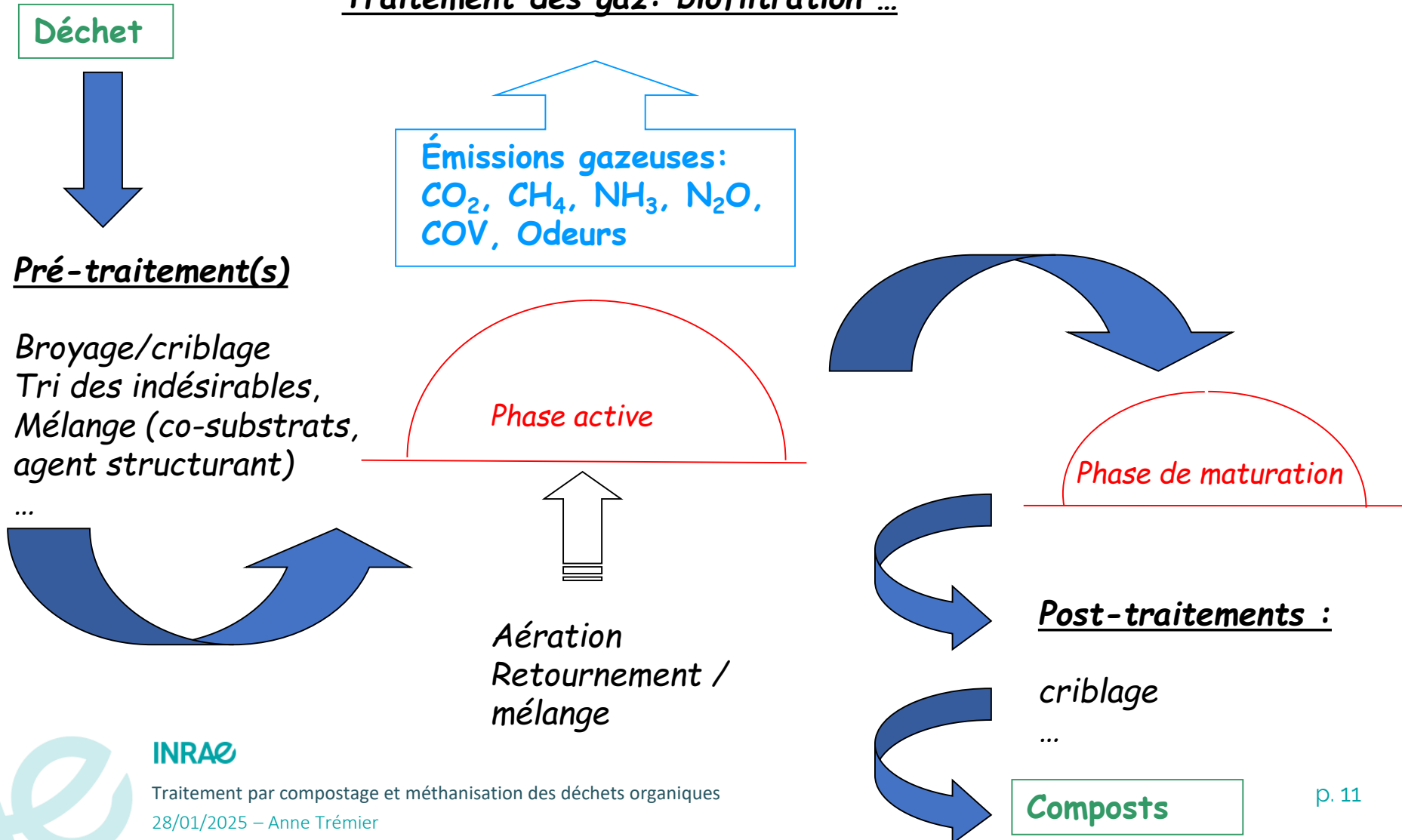
## Technologie

Vers, andains, réacteur couloir,  
Procédé semi-continu



# ➤ Compostage industriel : organisation des sites de traitement

## Traitement des gaz: biofiltration ...



# ➤ Compostage de déchets verts

Broyage et mise en andain (30 m x 10m x 3 m)



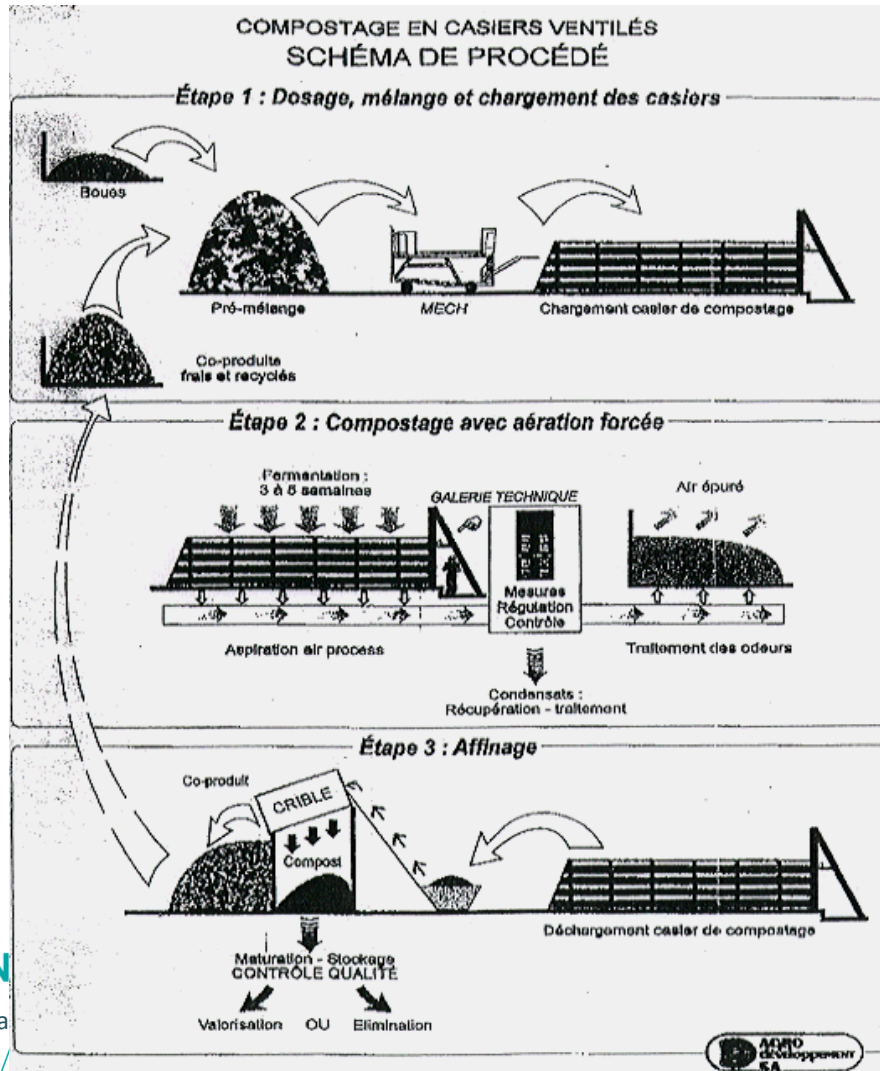
Retournement



Criblage  
8 à 20mm



## ➤ Compostage de boues de STEP



- Structurants = écorces, palette de bois, refus de criblage

- Ratio boue/struc. = 1/3 (V/V)

- Tunnel : 12 x 4 x 2.5m to 30x8x4 m

- Aération forcée. Flux d'air contrôlé par la température

- Un retournement

- Traitement des gaz, condensats, lixiviats

- Recyclage du structurant

- Maturation du compost

# Compostage des déchets ménagers résiduels

Prétraitement biologique  
Temps de séjour : 2 à 4 j.



Phase active et maturation de la  
part organique - aération forcée



Tri mécanique des indésirables

## ➤ Etat du compostage en France

- 723 plateformes de compostage (2020)
  - Dont 33 après TMB
- 9 millions de tonnes de déchets compostés
- Environ 3 millions de tonnes de compost produits



# ➤ Etat du compostage en France

Compostage individuel ou de proximité

- 2,2 millions de composteurs distribués
- 50% des français compostent déchets de cuisine et de table
- Estimated amount of composted waste:
  - Food waste: 42 kg/inh./year (about 50 % of biowaste produced)
  - Green and garden waste: 80 to 100 kg/inh./year



INRAE

Traitement par compostage et méthanisation des déchets organiques

28/01/2025 – Anne Trémier



# Approche générale: De la nature aux processus contrôlés





A quel autre type de transformation de la matière organique le compostage peut-il vous faire penser ?

## ➤ La biodégradation spontanée de la matière organique

Le compostage : une version accélérée de la transformation de la matière organique dans les sols...



Feuilles  
Bois



« Terre »

La matière organique, sous l'action d'organismes vivants, se transforme spontanément et lentement, jusqu'à fournir un sol enrichi en humus

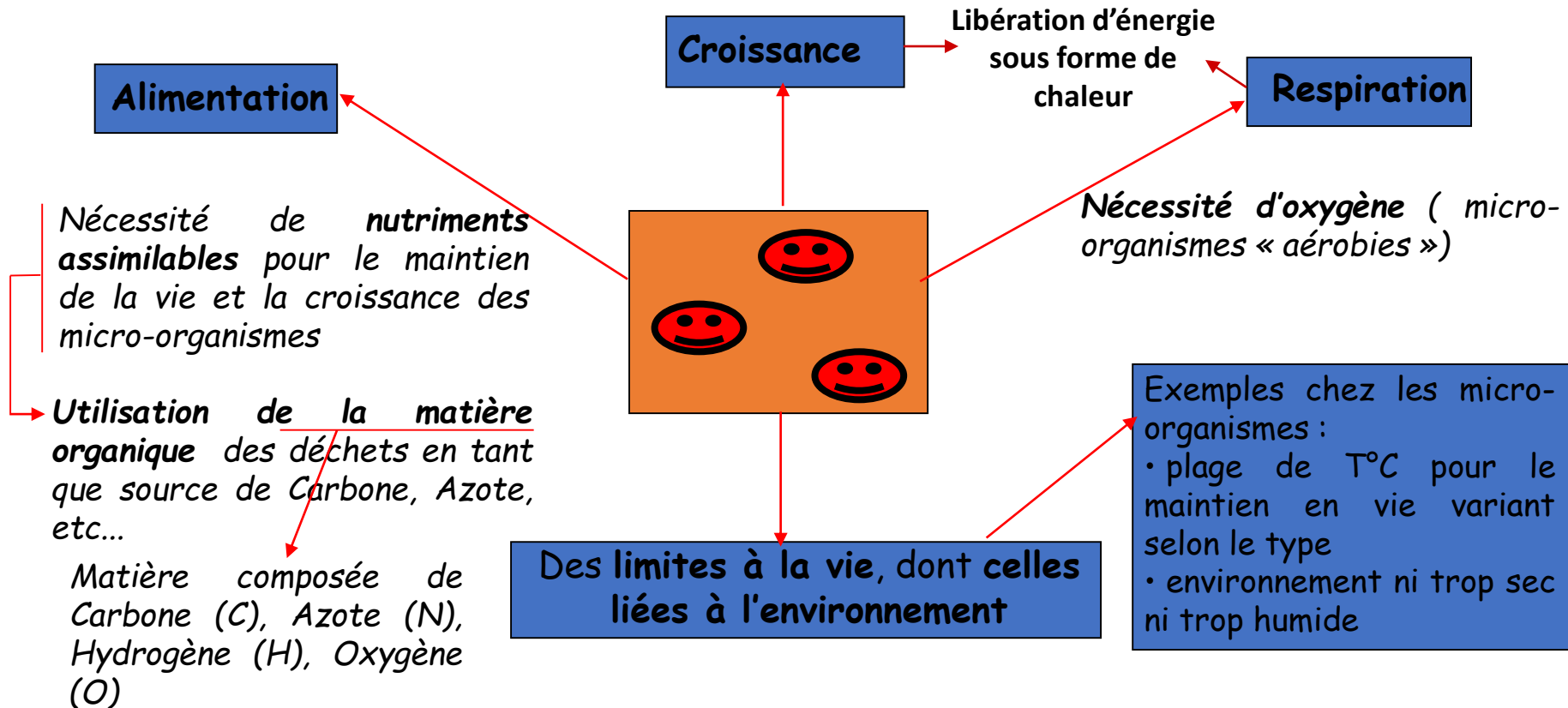
INRAE

Traitement par compostage et méthanisation des déchets organiques

28/01/2025 – Anne Trémier

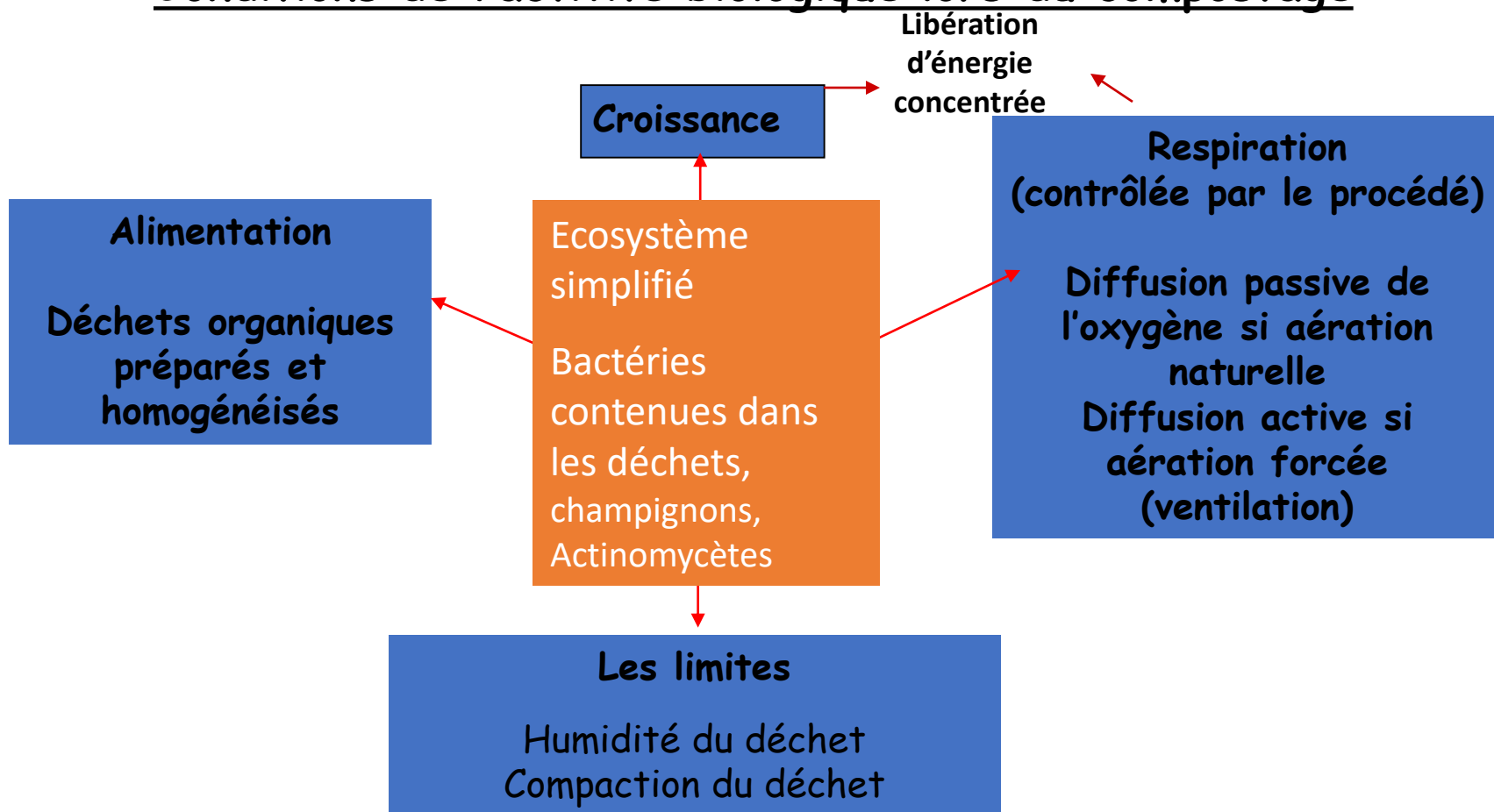
# ➤ La biodégradation spontanée de la matière organique

## Conditions de l'activité biologique : généralités



## ➤ De la biodégradation spontanée au compostage

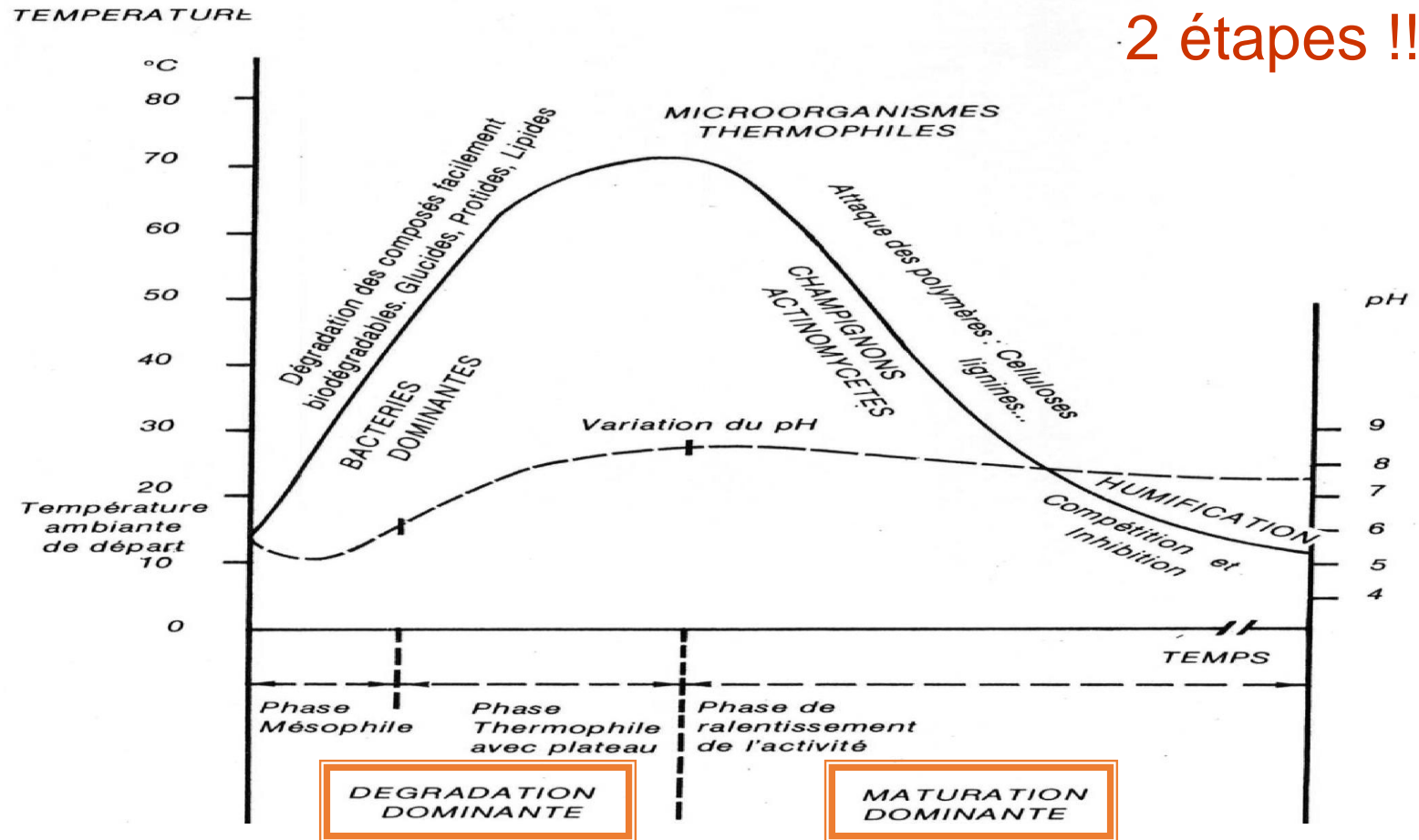
### Conditions de l'activité biologique lors du compostage



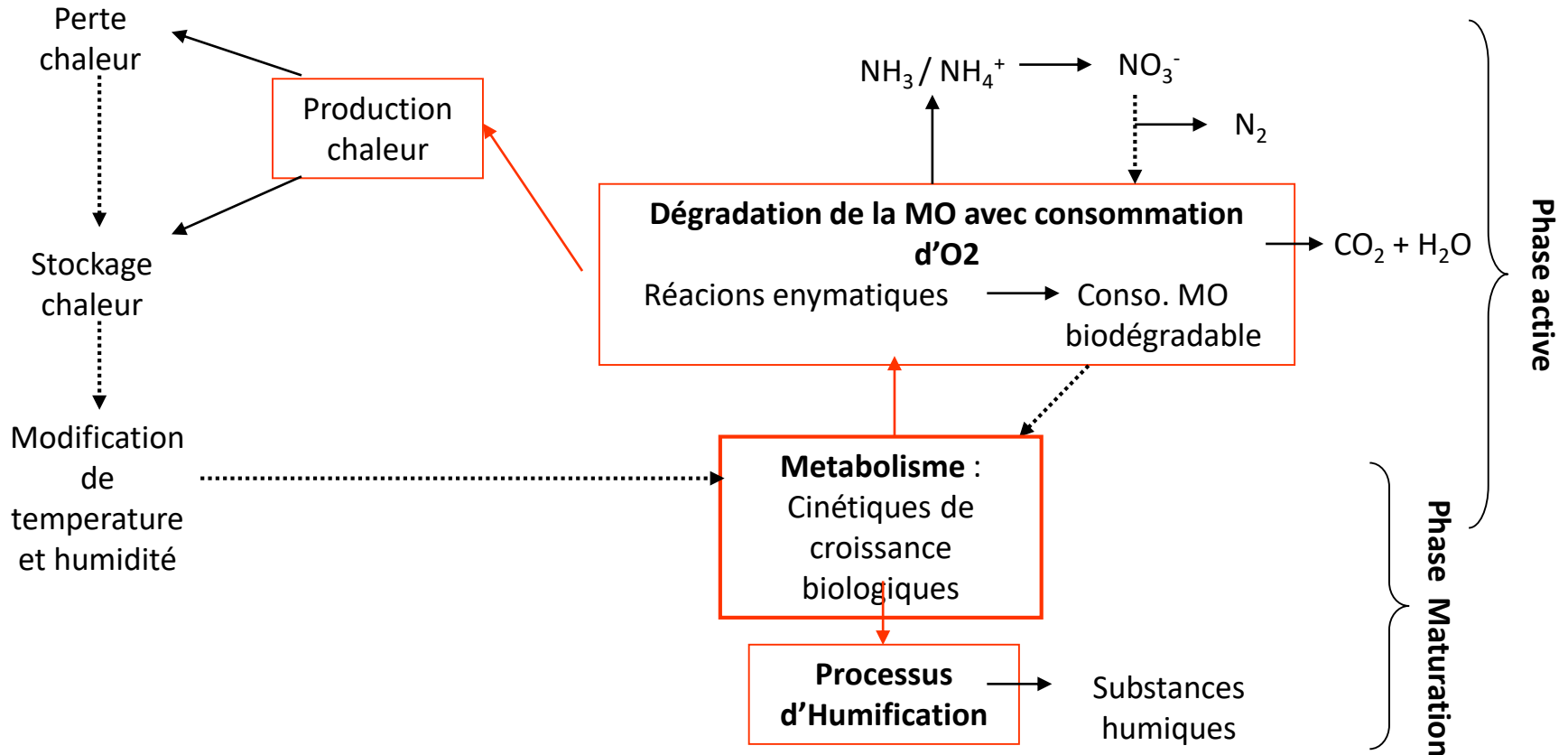
=> Mise en œuvre contrôlée. La masse à dégrader est « confinée » en tas, la température peut être élevée, le processus est plus rapide

## ➤ Les étapes du compostage

2 étapes !!



## ➤ Mécanismes réactionnels du compostage en bref



➤ Phénomènes nombreux et interconnectés

➤ La modélisation : une voie pour comprendre puis simuler

# Phase active : Caractéristiques des déchets et influence sur les phénomènes réactionnels





# > Caractéristiques des déchets

## Caractéristiques chimiques et biochimiques

$H_2O$  + Matière sèche  $\Rightarrow$  humidité (H%) et Taux de MS (MS%) [MS % = 100 – H %]

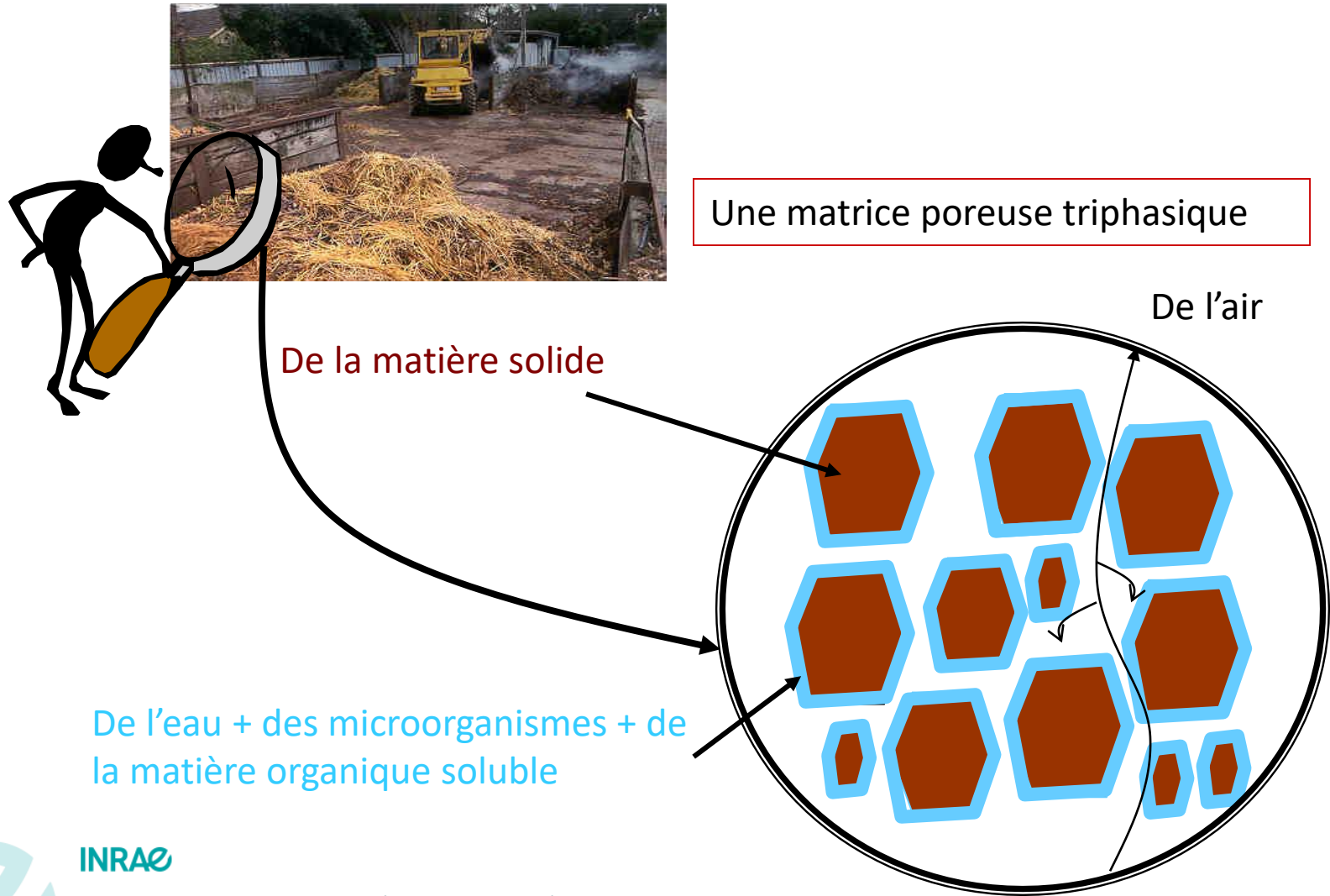
Matière sèche = matière minérale + matière organiques

### Matière organiques:

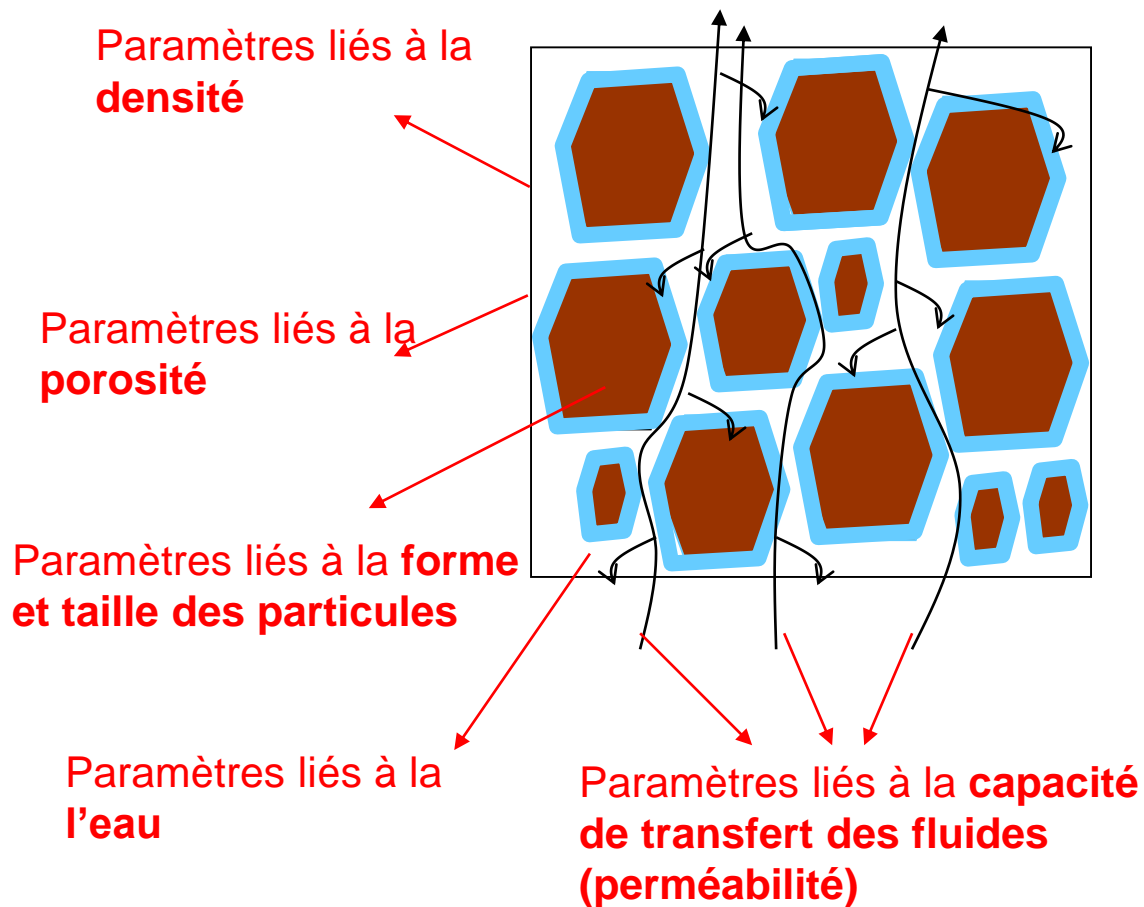
- Composition: Carbone, Oxygène, Hydrogène, Azote, Phosphore, Soufre
- Demande chimique en oxygène (DCO), Demande biologique en oxygène (DBO)
- Fractions biochimiques:
  - Fraction soluble à l'eau, cellulose, hemicellulose, lignine
  - Sucres, lipides, protéines...

***Pendant le compostage : Consommation de la fraction biodégradable ("Stabilisation" de la MO) et séchage du matériau***

## ➤ Structure de la matière organique à dégrader



# ➤ Caractéristiques physiques des déchets



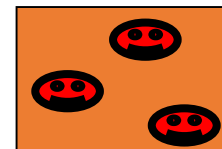
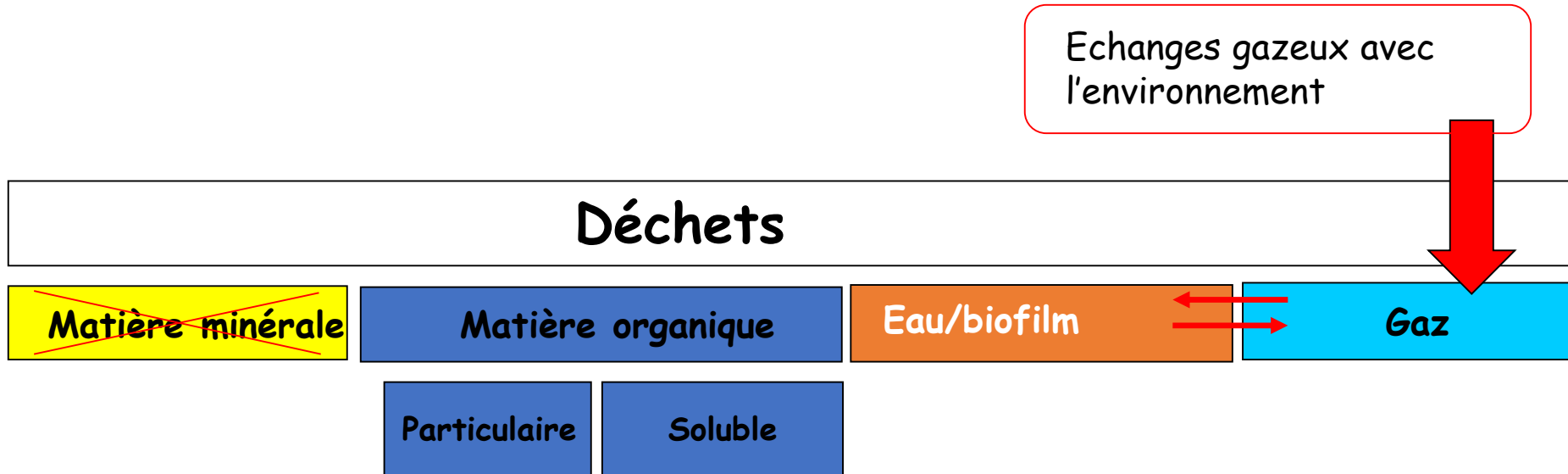
## Caractéristiques physiques

- ↪ interconnectées
- ↪ dépendant du substrat et de sa préparation initiale
- ↪ hétérogénéité interne au massif de déchets
- ↪ influencent le déroulement du compostage
- ↪ variation au cours du compostage

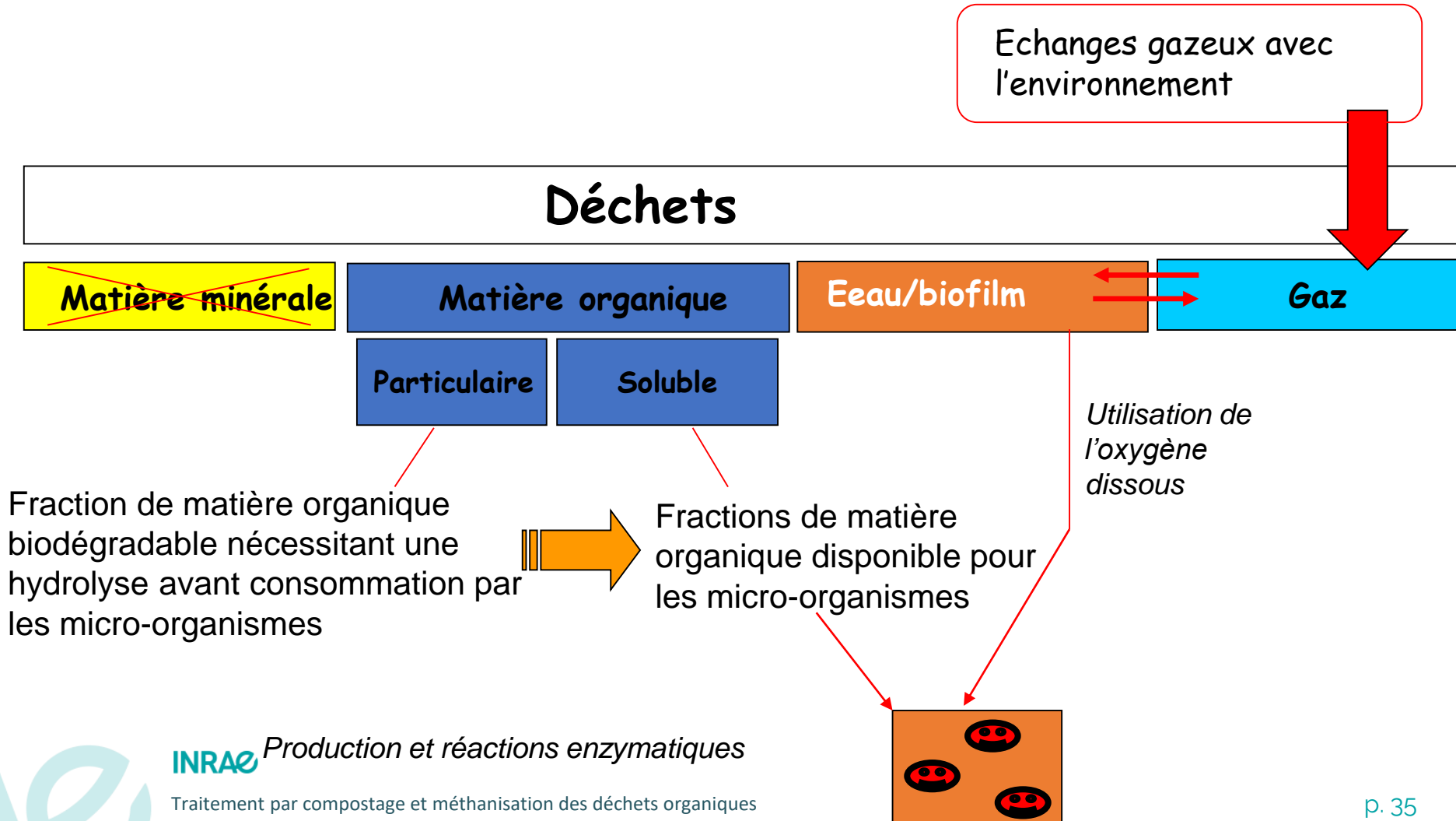
# Phase active : focus sur les processus biologiques



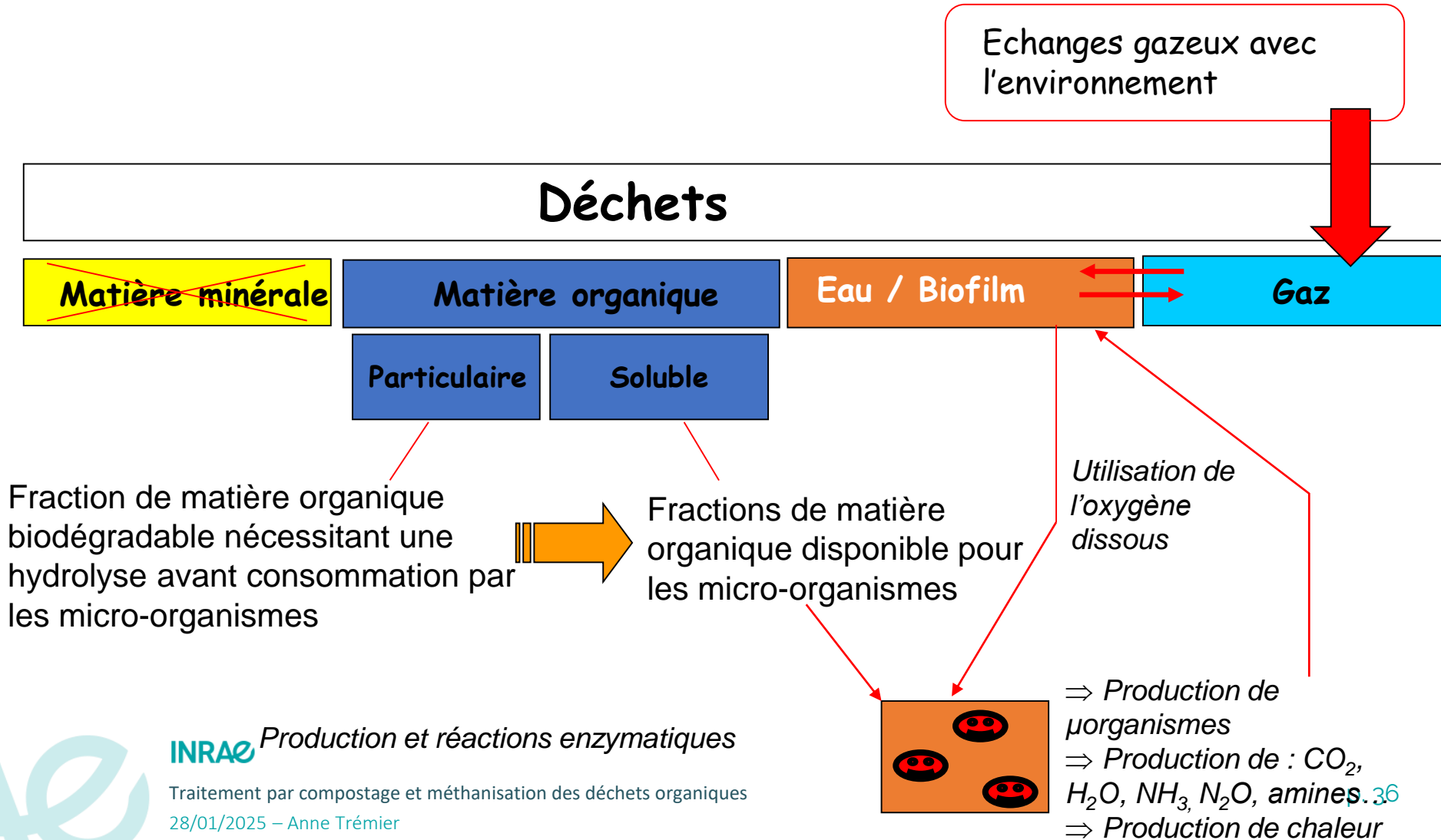
# ➤ Représentation conceptuelle des processus biologiques



# ➤ Représentation conceptuelle des processus biologiques



# ➤ Représentation conceptuelle des processus biologiques

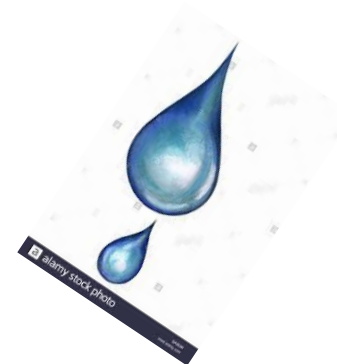




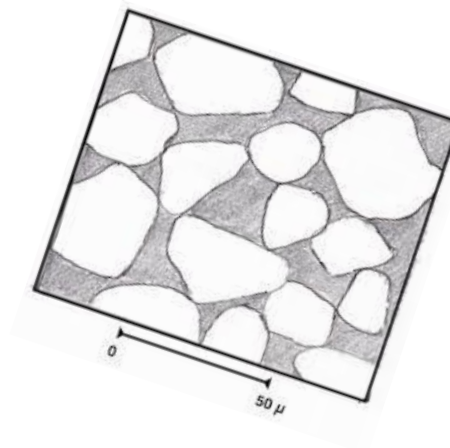
Quels paramètres environnementaux ou paramètres de mise en œuvre du compostage vont influencer son déroulement ?



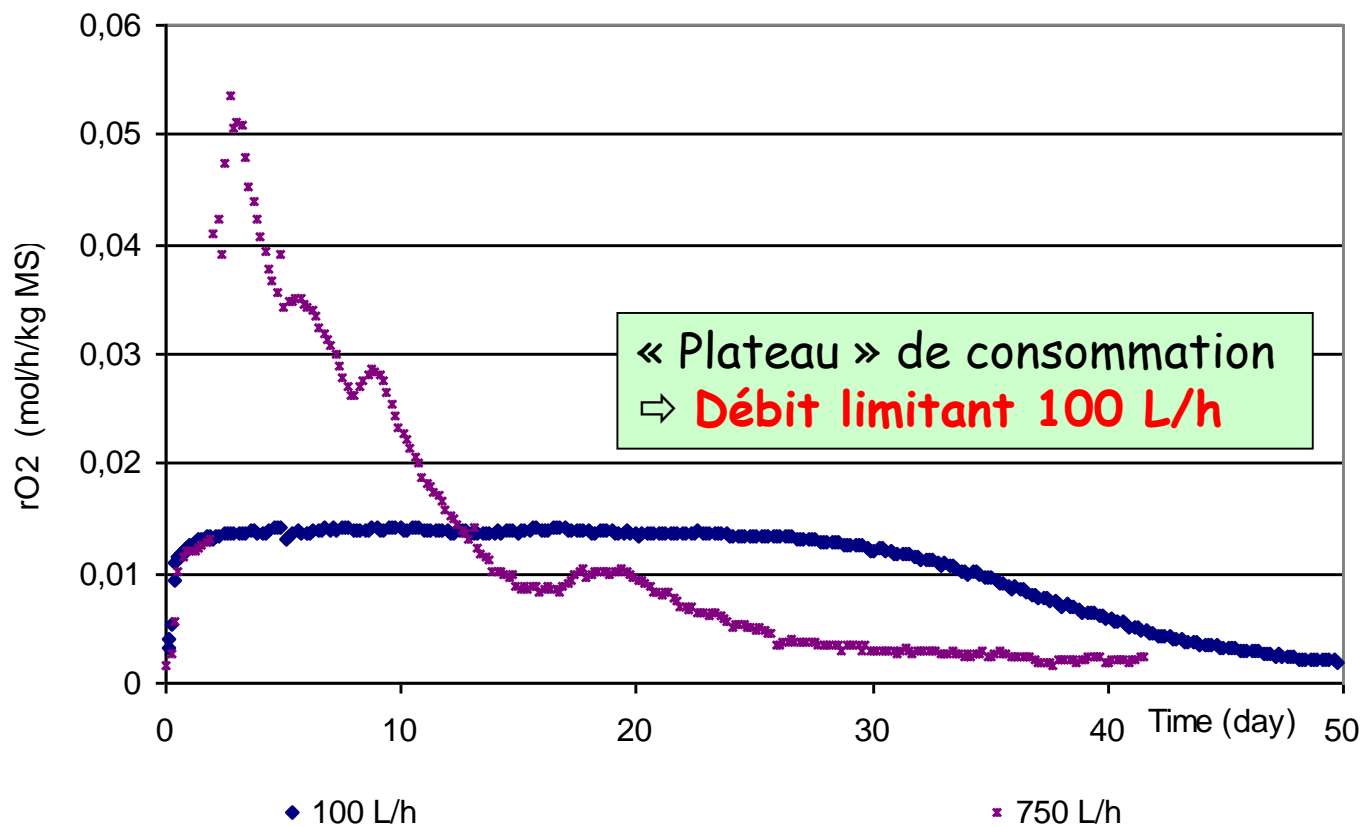
# ➤ Comment la biodégradation est elle influencée par les paramètres environnant le procédé ?



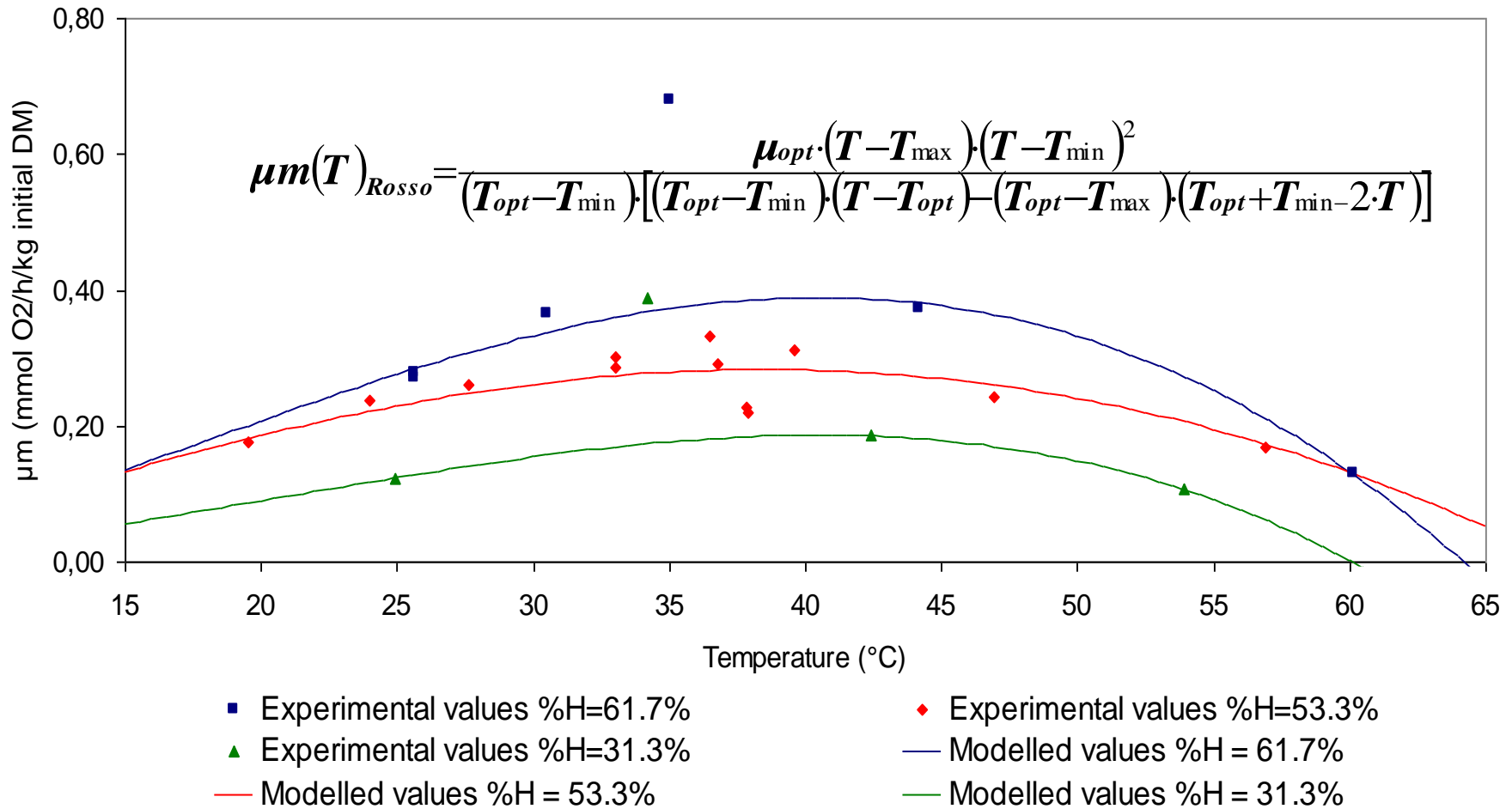
Exemple de la température, humidité, taille des particules, ratio de mélange



## ➤ Influence du débit d'air

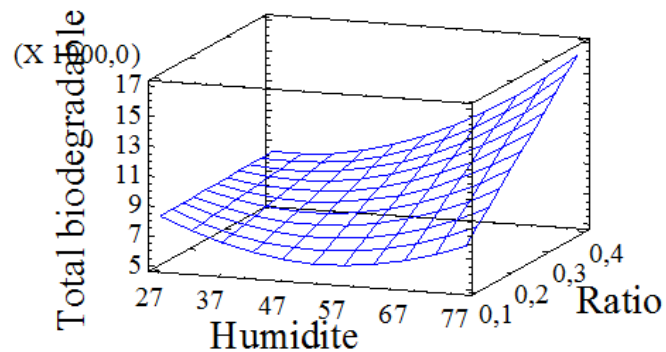


## ➤ Influence de la température

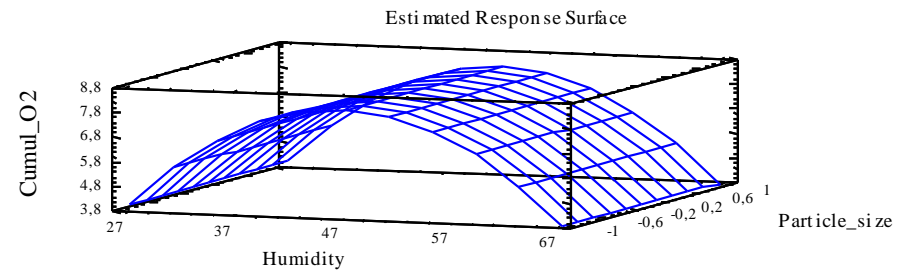


# ➤ Influence des caractéristiques physiques du déchet

Cas d'une boue mélangée avec un agent structurant



Humidité = paramètre majeur  
ratio = influence le potentiel biodegradable disponible



- Effet quadratique de l'humidité:
  - Faible %H limite activité biologique
  - Fort %H = saturation de la matrice poreuse
  - Optimum autour de 50 %

# Etape de Maturation



**INRAE**

Traitement par compostage et méthanisation des déchets organiques  
28/01/2025 – Anne Trémier

## ➤ Principaux mécanismes

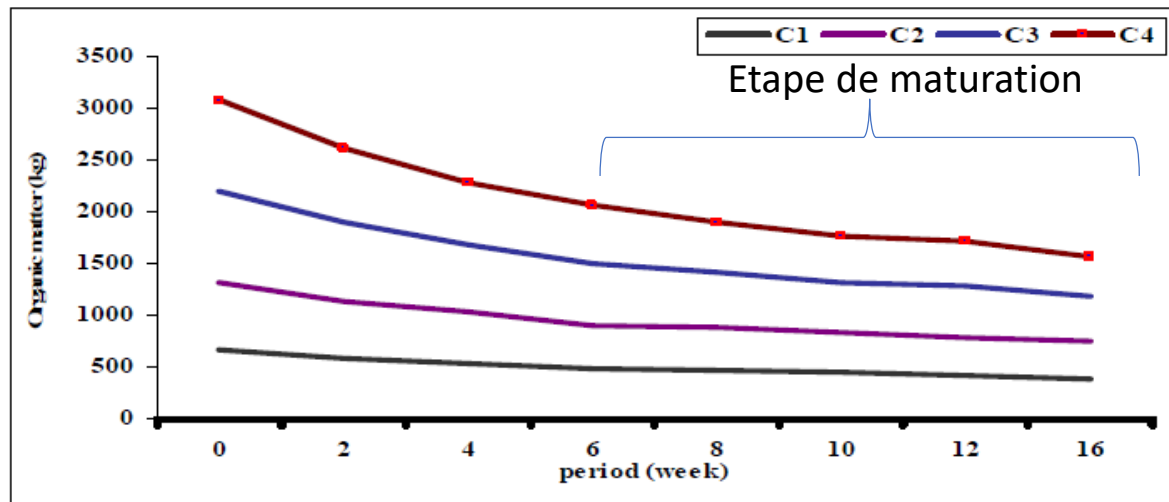
Mécanismes d'humification = processus de  
**néoformation**



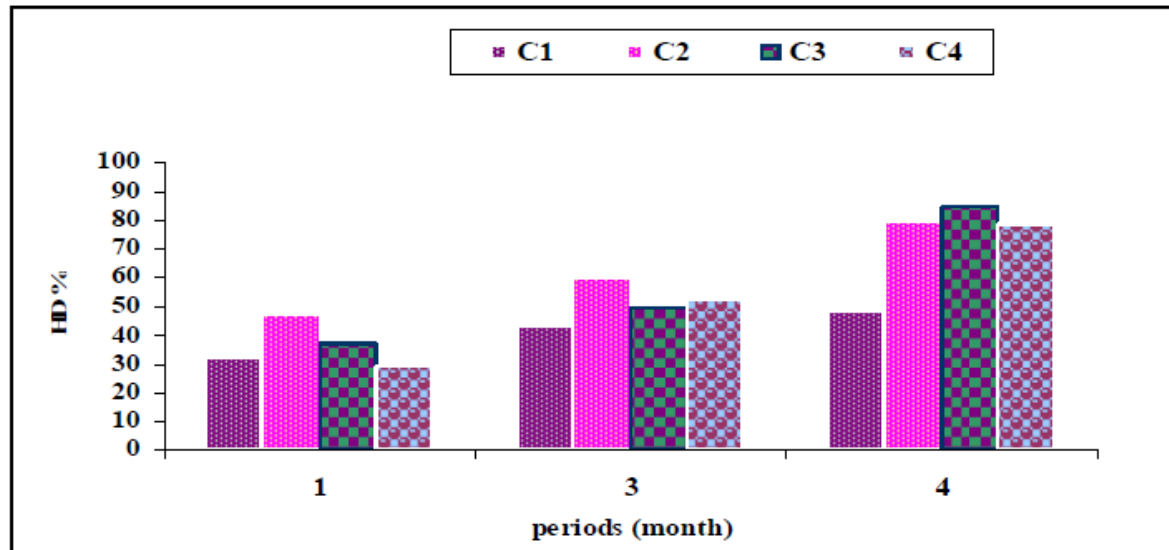
Petites molécules solubilisées et issues de la  
phase active qui se restructurent pour former  
les **molécules humiques**

## ➤ Quelques observations

Matière organique



Degré d'humification

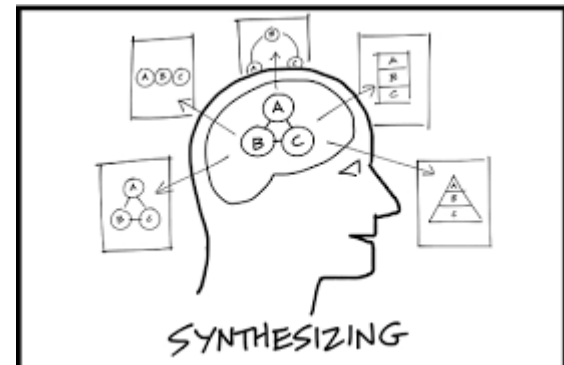


M. M. I. Afifi, A. N. Estefanous, and Y. S. El-Akshar, "Biological, chemical and physical properties of organic wastes as indicators maturation of compost", *Journal of Applied Sciences Research*, 8(4): pp. 1857-1869, 2012.

Traitement par compostage et méthanisation des déchets organiques

28/01/2025 – Anne Trémier

# Synthèse compostage





# ➤ Principales observations sur le compostage

## Phase active

- ▷ Biodegradation de la MO la plus accessible et la plus biodégradable,
- ▷ Transformation physique importante
- ▷ Forte élévation de température
- ▷ Durée courte (quelques jours à un mois)
- ▷ Perte de masse élevée
- ▷ Consommation d'oxygène importante

## Maturation

- ▷ Bio-réorganisation de la MO résiduelle
- ▷ Peu de transformation physique
- ▷ Faible variation de température
- ▷ Durée plus ou moins longue (de 1 à 6 mois)
- ▷ Peu de perte de masse
- ▷ Faible consommation d'oxygène

# Compost : bénéfices et impacts



**INRAE**

Traitement par compostage et méthanisation des déchets organiques  
28/01/2025 – Anne Trémier

## ➤ Un double effet agronomique

Objectif = effet agronomique avec recherche d'un effet fertilisant (engrais) ou d'un effet d'amendement

Influence sur la **structure physique, chimique et biologique des sols**, principalement en raison des substances humiques des composts

- la formation d'agrégats « subst. hum. / argiles » structure le sol, d'où échanges gazeux améliorés, meilleure résistance à l'érosion et au compactage
- l'augmentation de la capacité de rétention d'eau améliore le drainage des sols
- la libération de  $CO_2$  améliore la photosynthèse et rend disponibles les phosphates
- etc...

Apport **d'azote, de phosphore et de potassium** + apport de minéraux divers (calcium, magnésium...)

- l'apport de compost augmente la CEC des sols, d'où une optimisation ultérieure de la rétention des éléments nutritifs dans les sols
- ce sont les cinétiques de minéralisation de la MO apportée par les composts qui conditionnent la mise à disposition des éléments fertilisants pour les plantes
- etc...

# ➤ Effets agronomiques dépressifs potentiels

Mais, attention aux **effets dépressifs** potentiels des composts...

Ils sont causés par un **résiduel de MO biodégradable** qui va engendrer une **activité biologique non contrôlée** au sein des sols qui est à l'origine des effets dépressifs sol/végétaux

- blocage d'oxygène et d'azote assimilables pour les plantes pour la dégradation biologique de la MO par la microfaune du sol
- libération d'ammoniac par désamination oxydative dans le sol des acides aminés du compost, entraînant une toxicité nuisible à la germination et à la croissance des végétaux
- présence de métabolites phytotoxiques comme les acides acétique, propionique et butyrique et très probablement d'autres toxines
- plus grande solubilité des sels et métaux lourds ayant pour conséquences un excès de salinité et une pollution des sols
- etc...

# ➤ Méthanisation



## ➤ Définition et contexte

- Méthanisation ou digestion anaérobie :

**Processus biologique** de dégradation de la matière organique par une flore microbienne effectuée **en l'absence d'oxygène**.

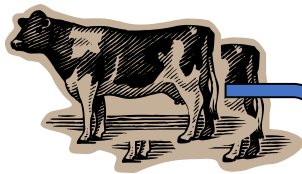
La biodégradation de la matière organique conduit à la formation de **biogaz** : mélange gazeux de méthane et de dioxyde de carbone.

Le résidu organique constitue le **digestat**

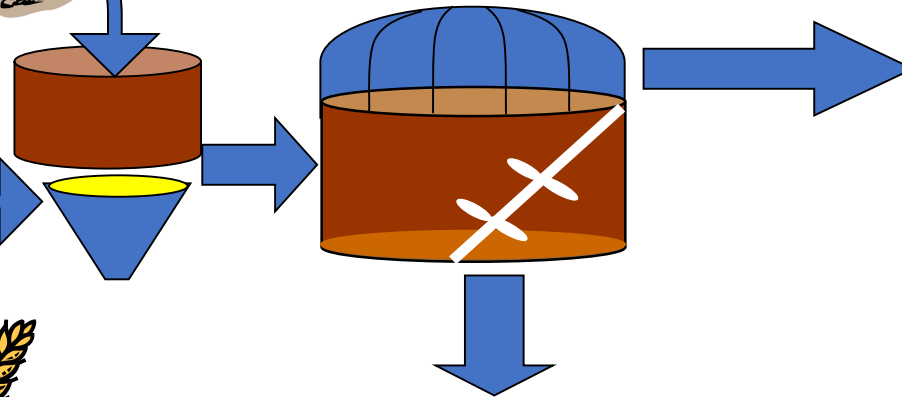


## ➤ Définition et contexte

### Substrats



### Réacteurs



### Digestats



### Biogaz



## ➤ Définition et contexte

- Processus existant dans les écosystèmes naturels et cultivés : marais, intestins des animaux et insectes, rizières, fonds des lacs ...





## ➤ Définition et contexte

Méthanisation, environnement et énergie

- Changement climatique, réserves finies de pétrole...
  - captage du biogaz  $\Leftrightarrow$  régulation des émissions de  $\text{CH}_4$  et donc de leur contribution à l'effet de serre
  - utilisation des biocarburants = opportunité
- Digestion anaérobie d'effluents et de déchets :
  - biogaz = production d'EnR
  - et donc économie d'énergie fossile !
  - digestat = restitution d'un amendement organique aux sols

**méthanisation = technologie clé pour la gestion  
des déchets organiques et la bioéconomie**

## ➤ Définition et contexte



(Bio)Méthane : un gaz naturel que l'on veut domestiquer

- A. Volta en 1776 observe que le gaz produit dans les marais est combustible
- Années 40, digesteurs « Ducellier et Isman » en milieu agricole sur fumier



digesteur agricole et cuisinière alimentée en gaz de fumier<sup>10</sup> (1952)

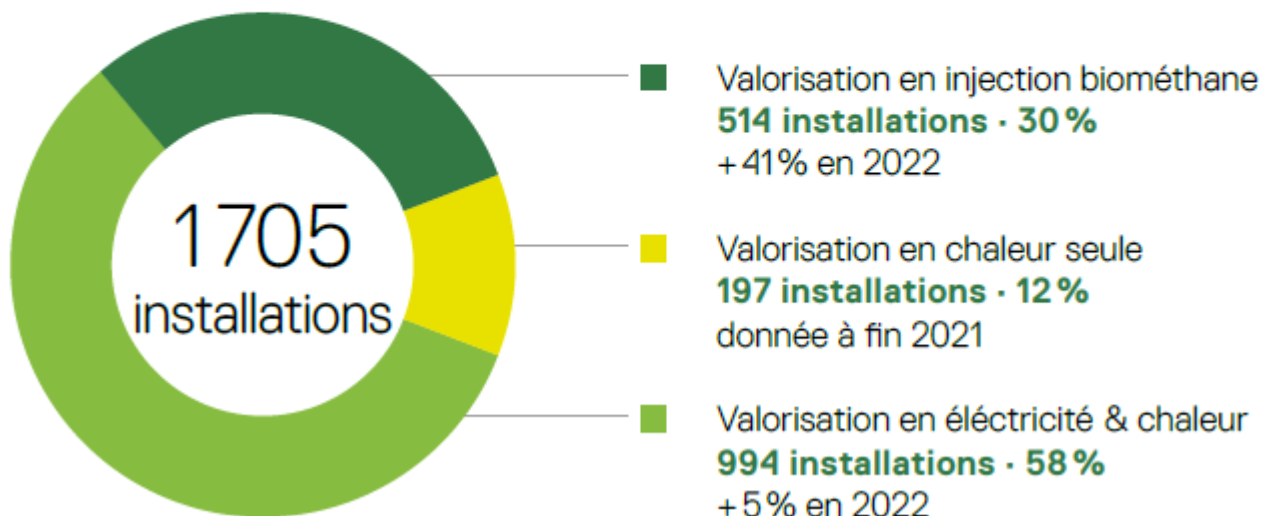
- Regain d'intérêt dans les années 70 (1<sup>ère</sup> crise pétrolière) toujours en milieu agricole
- Application au traitement de la pollution organique des effluents industriels ou urbains : boues d'épuration, effluents d'IAA
- Application au traitement des déchets organiques solides : déchets ménagers, déchets industriels, méthanisation en CSD
- Nombreux digesteurs en Allemagne où politique énergétique (électricité dite verte) plus favorable à production (prix de rachat plus élevé)
- Regain d'intérêt en France...
  - Modification de la réglementation et incitation tarifaire dès 2006
  - Développement de la méthanisation hors sol des déchets
  - Production de cultures énergétiques en vue de les méthaniser
  - Politiques environnementale et énergétique

## ➤ Définition et contexte

La méthanisation : Etat des lieux en France

### **NOMBRE D'INSTALLATIONS QUI PRODUISENT ET VALORISENT DES GAZ RENOUVELABLES À FIN 2022**

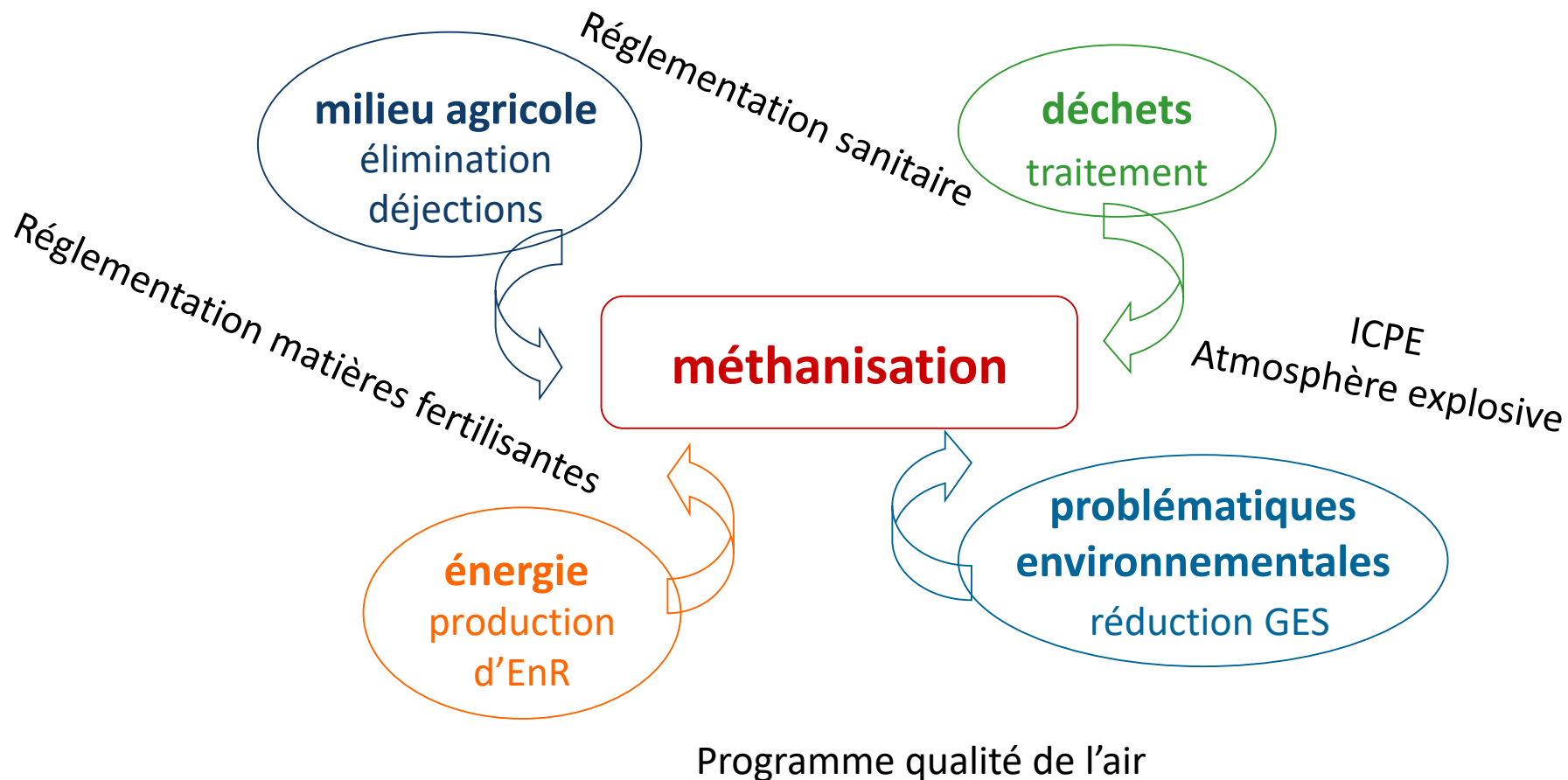
Source : SER d'après, ODRé décembre 2022 & Tableau de bord du MTE au 31/12/2022



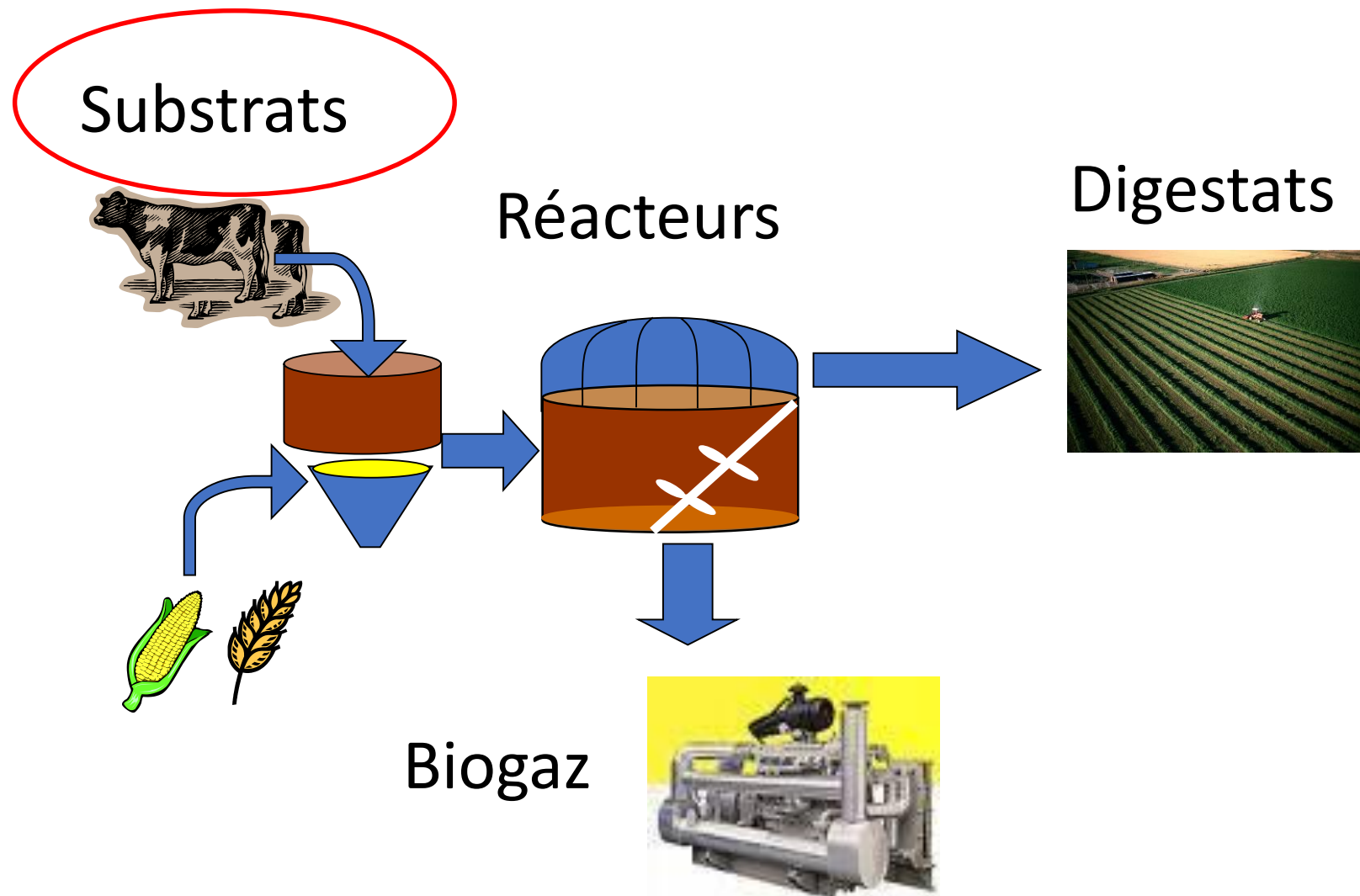
Dont environ 100 STEP et environ 200 ISDND

## ➤ Définition et contexte

Une réglementation complexe



## ➤ Méthanisation : processus réactionnels





Qu'est ce qui se méthanise ?



## ➤ La méthanisation : processus réactionnels

- Devenir de la matière organique
  - Composés « facilement dégradables » (sucres simples, protéines)
    - ⇒ dégradés en quelques heures
  - Composés « difficilement dégradables » (celluloses, graisses)
    - ⇒ dégradés en quelques jours
  - Composés « non dégradables » (lignine, plastique)
    - ⇒ dégradés en quelques années (ou jamais)



## ➤ La méthanisation : processus réactionnels

- Devenir de la matière organique
  - Transformation en biogaz : dépend de la composition biochimique de la matière organique



1 tonne dégradée	Nm <sup>3</sup> de CH <sub>4</sub>
sucre	370
protéines	500
graisses	1000



## ➤ La méthanisation : processus réactionnels

- Potentiel méthanogène

Composé	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / tonne MV
Lisiers porcins	150 - 300
Fumiers bovins	150 - 200
Feuilles de betterave (ensilage)	250 - 350
Biodéchets ménagers	400 - 500
Ordures ménagères	150 - 250
Graisses (abattoirs)	600 - 800

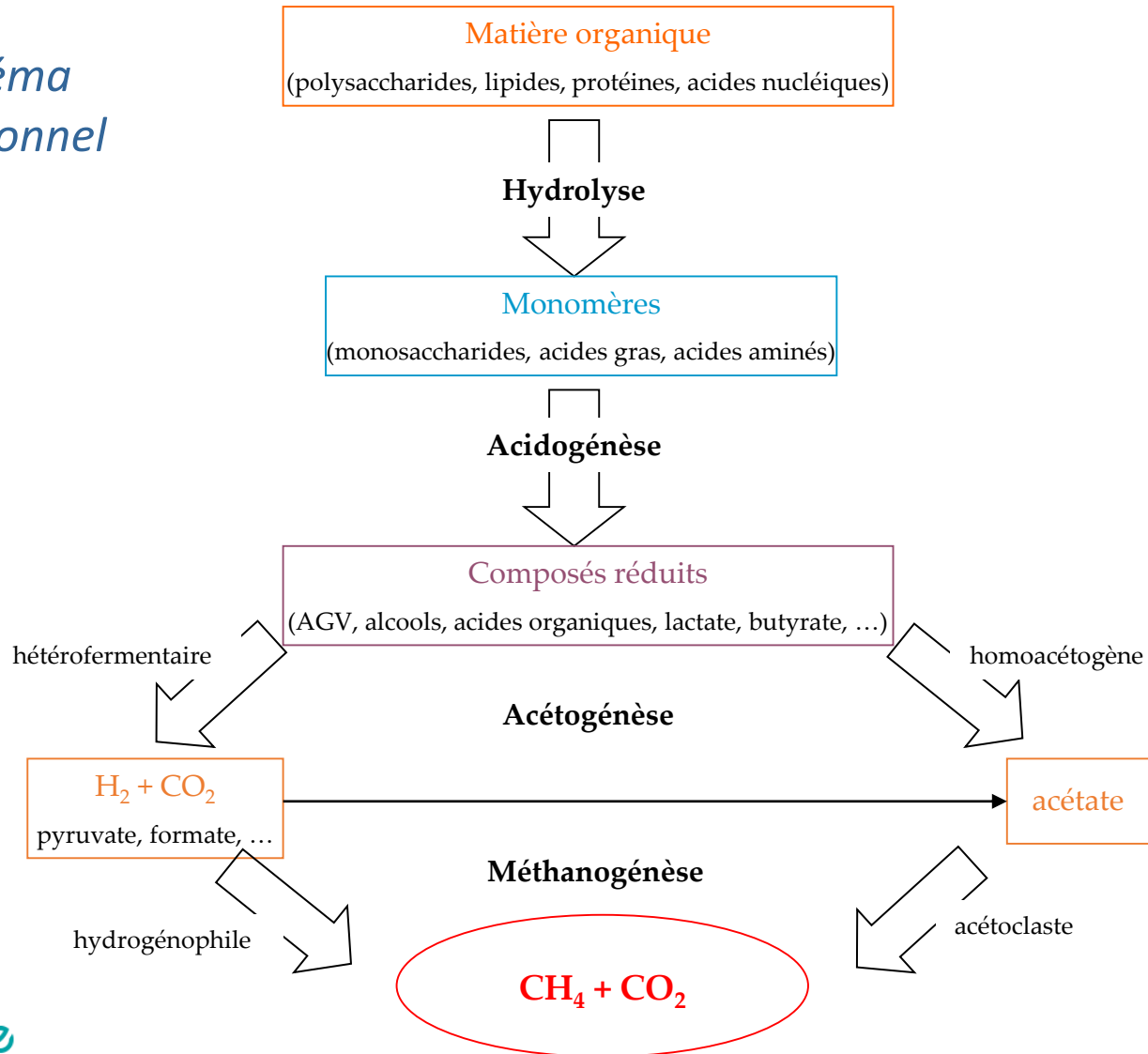
## ➤ La méthanisation : processus réactionnels

- Les grandes étapes de la digestion anaérobie
  - Méthanisation = ensemble de réactions enzymatiques
  - Chaîne trophique constituée d'un consortium de micro-organismes travaillant en coopération, en synergie ou parfois en compétition
  - Transformation des polymères carbonés en  $(\text{CH}_4 + \text{CO}_2)$  en 4 grandes étapes



## ➤ La méthanisation : processus réactionnels

### Schéma réactionnel



## ➤ La méthanisation : processus réactionnels

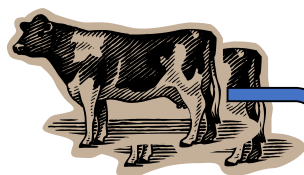
- Conditions physico-chimiques

- Potentiel rédox : -300 à -500 mV
- pH optimal : 6.5 à 7.3
- Température :
  - 10 à 25°C ⇔ digestion psychrophile
  - 30 à 40°C ⇔ digestion mésophile
  - 50 à 65°C ⇔ digestion thermophile
- Éléments nutritifs nécessaires : Fe, Ni, Mg ...

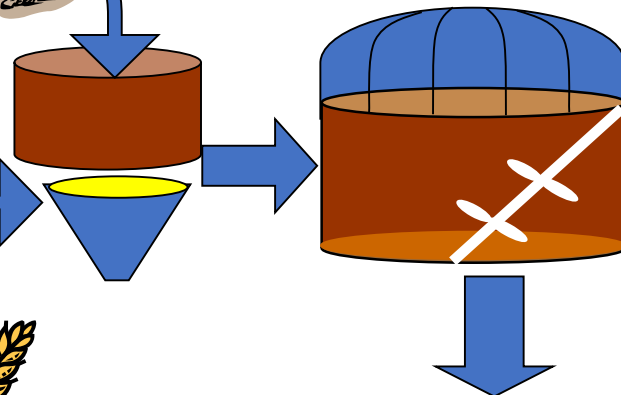


## ➤ La méthanisation : procédés de traitement

Substrats



Réacteurs



Digestats



Biogaz





Qu'est ce qui va influencer la réaction de méthanisation ?



## ➤ La méthanisation : procédés de traitement

Mise en œuvre de la méthanisation

- **Température** : influence la vitesse de réaction
  - Température ambiante : digestion psychrophile
  - Mode mésophile (30 – 40°C) : très utilisé en process agricole
  - Mode thermophile (50 – 65°C) : augmente la vitesse d'hydrolyse + hygiénisation



## ➤ La méthanisation : procédés de traitement

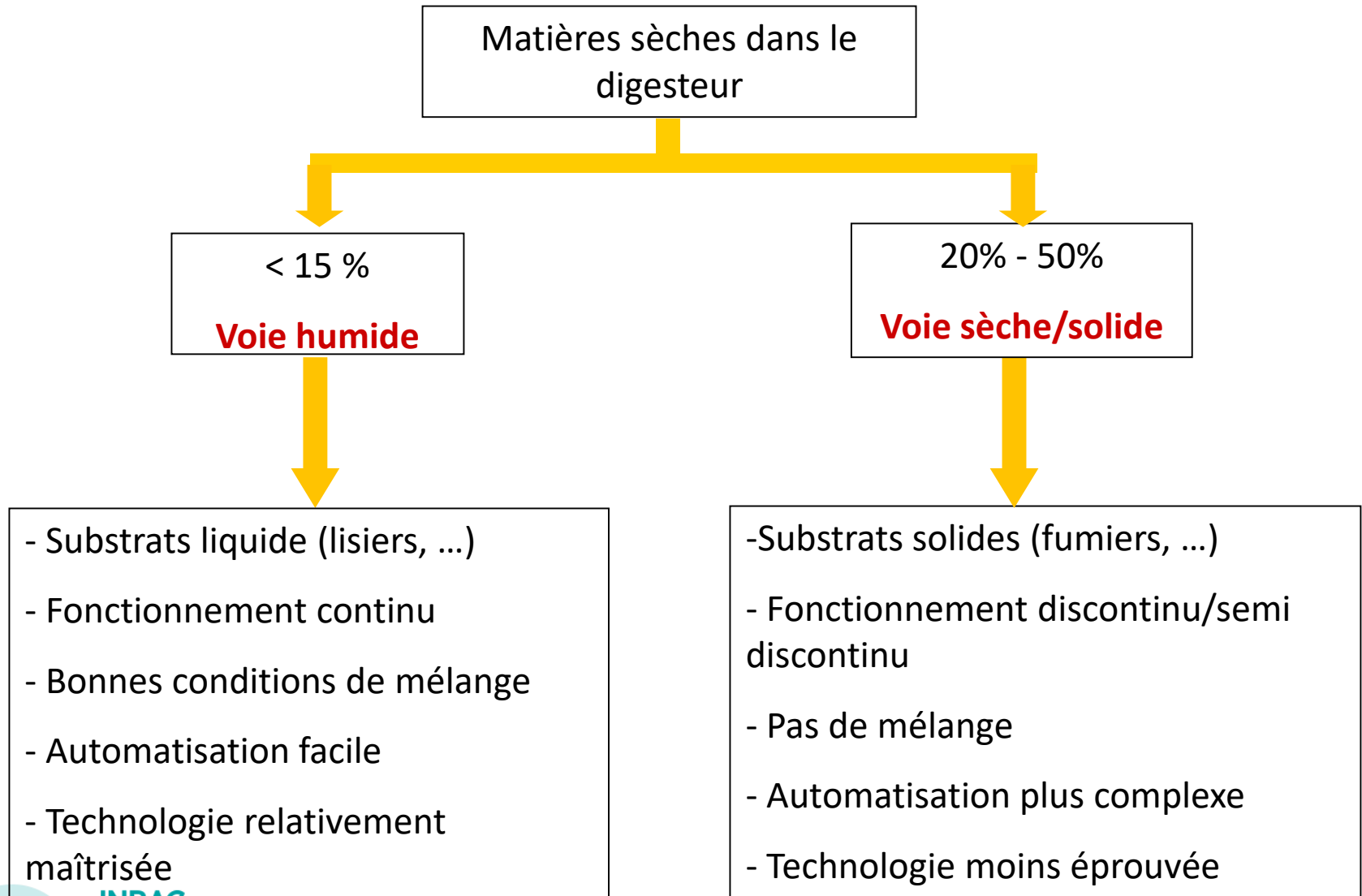
Mise en œuvre de la méthanisation

- **Mode d'alimentation du digesteur**
  - Continu : le plus fréquent, débit fixé assurant un certain temps de séjour du substrat dans réacteur
  - Discontinu (batch) : alimentations puis vidanges successives
  - Discontinu séquentiel (semi batch) : cycles de remplissage/digestion/vidange + conservation d'une partie de la biomasse

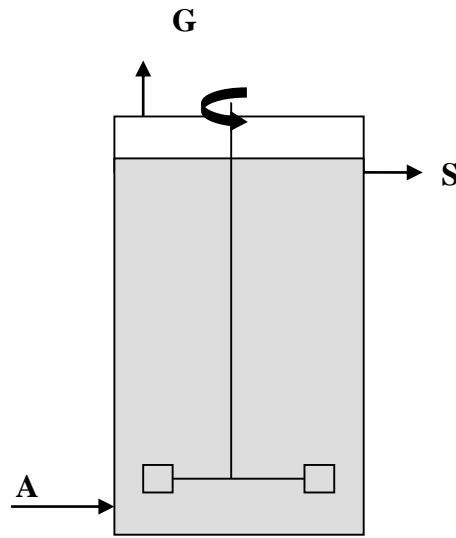




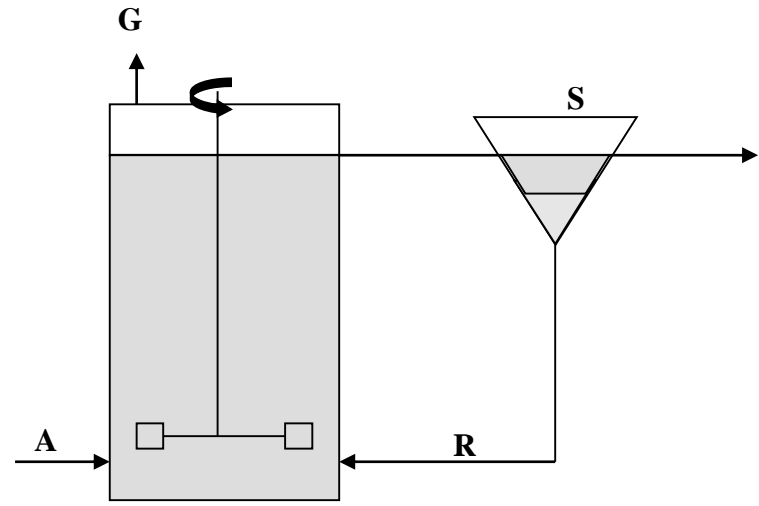
# ➤ La méthanisation : procédés de traitement



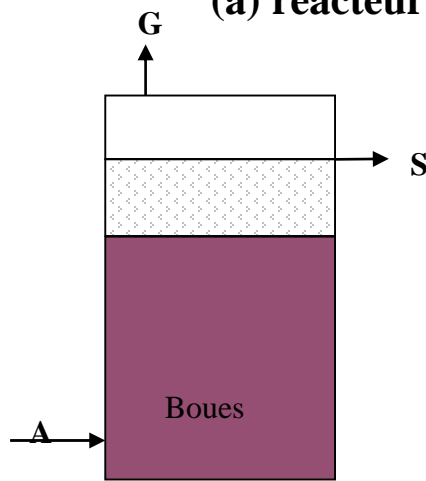
## ➤ Types de digesteurs voie humide



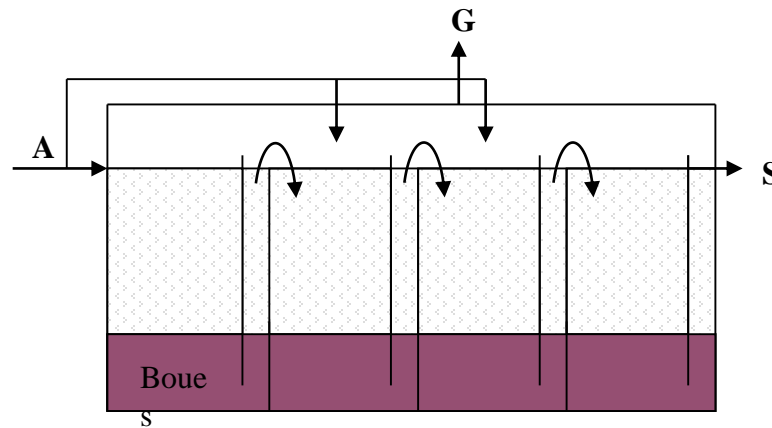
(a) réacteur mélangé



(b) contact anaérobie



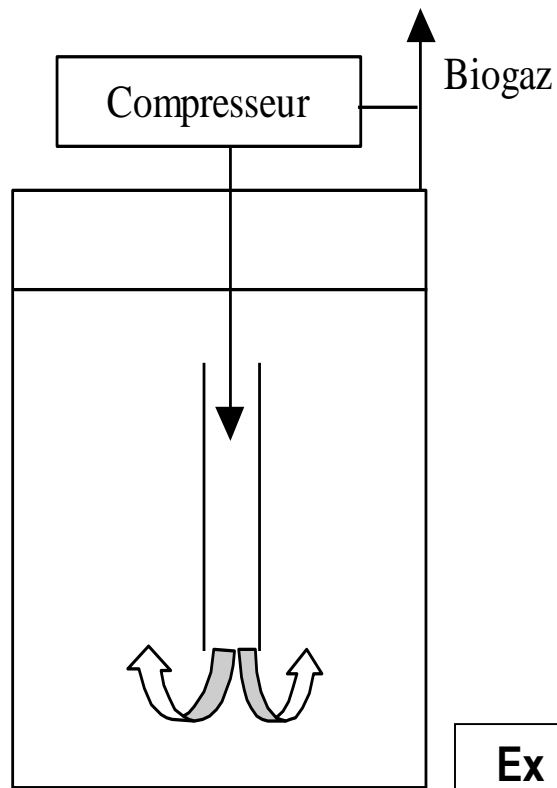
(c) lit de boues



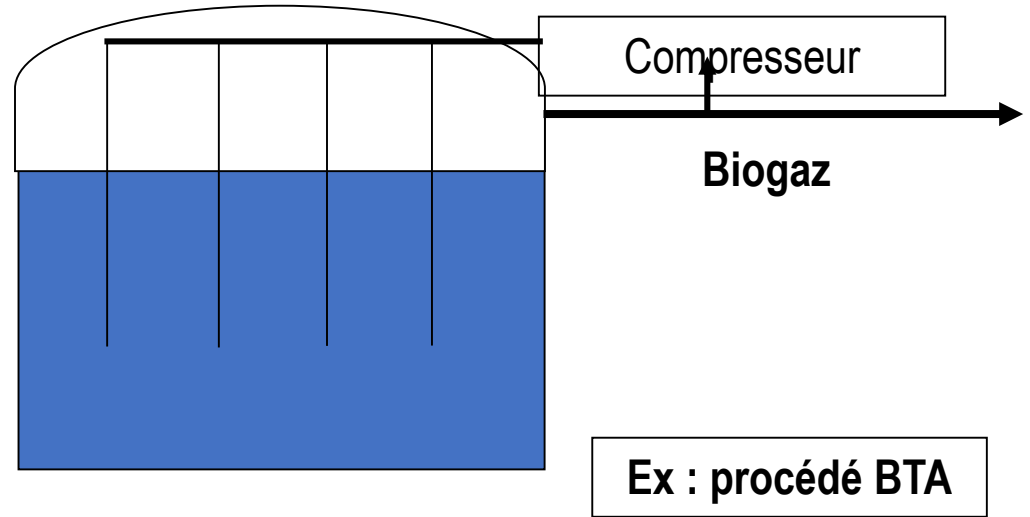
(d) réacteur à compartiments horizontaux

## ➤ Types de digesteurs voie humide

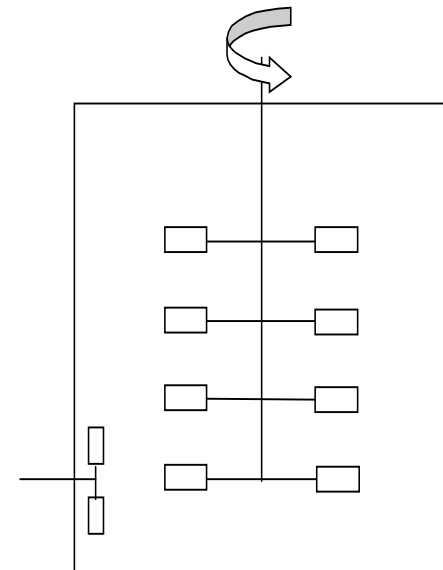
### 1) Ré-introduction du biogaz



**Ex : procédé Linde**



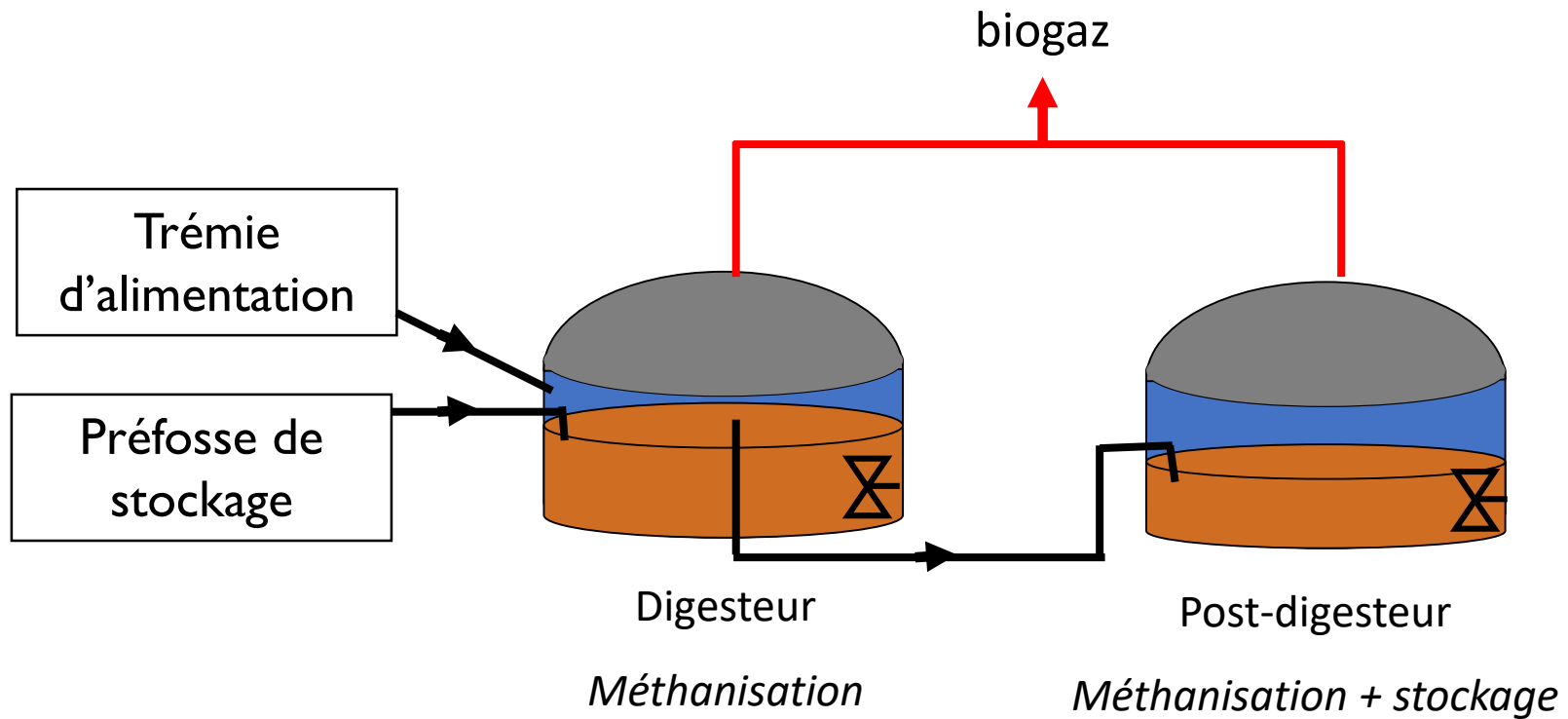
### 2) Pales ou turbines



## ➤ Types de Digesteurs voie humide

Filière type de méthanisation humide à la ferme

### Type infiniment mélangé



## ➤ Méthanisation voie solide

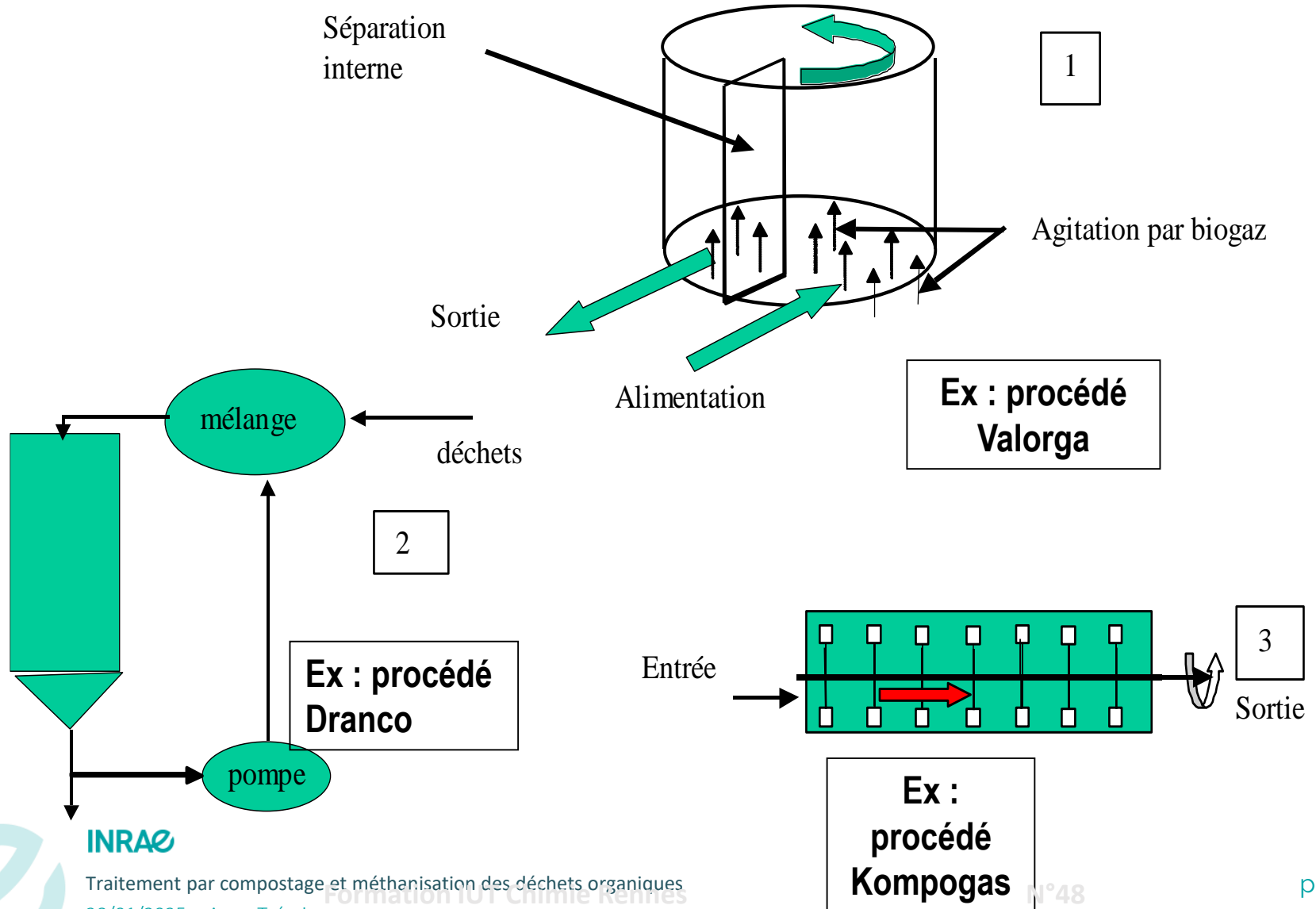
### Généralités

- Alimentation en continu ou batch
- Température mésophile ou thermophile
- Réacteurs monophasiques  $\Rightarrow$  majoritaire en OM 92% du gisement traité
- Homogénéisation : introduction de biogaz, agitation mécanique interne, recirculation du digestat

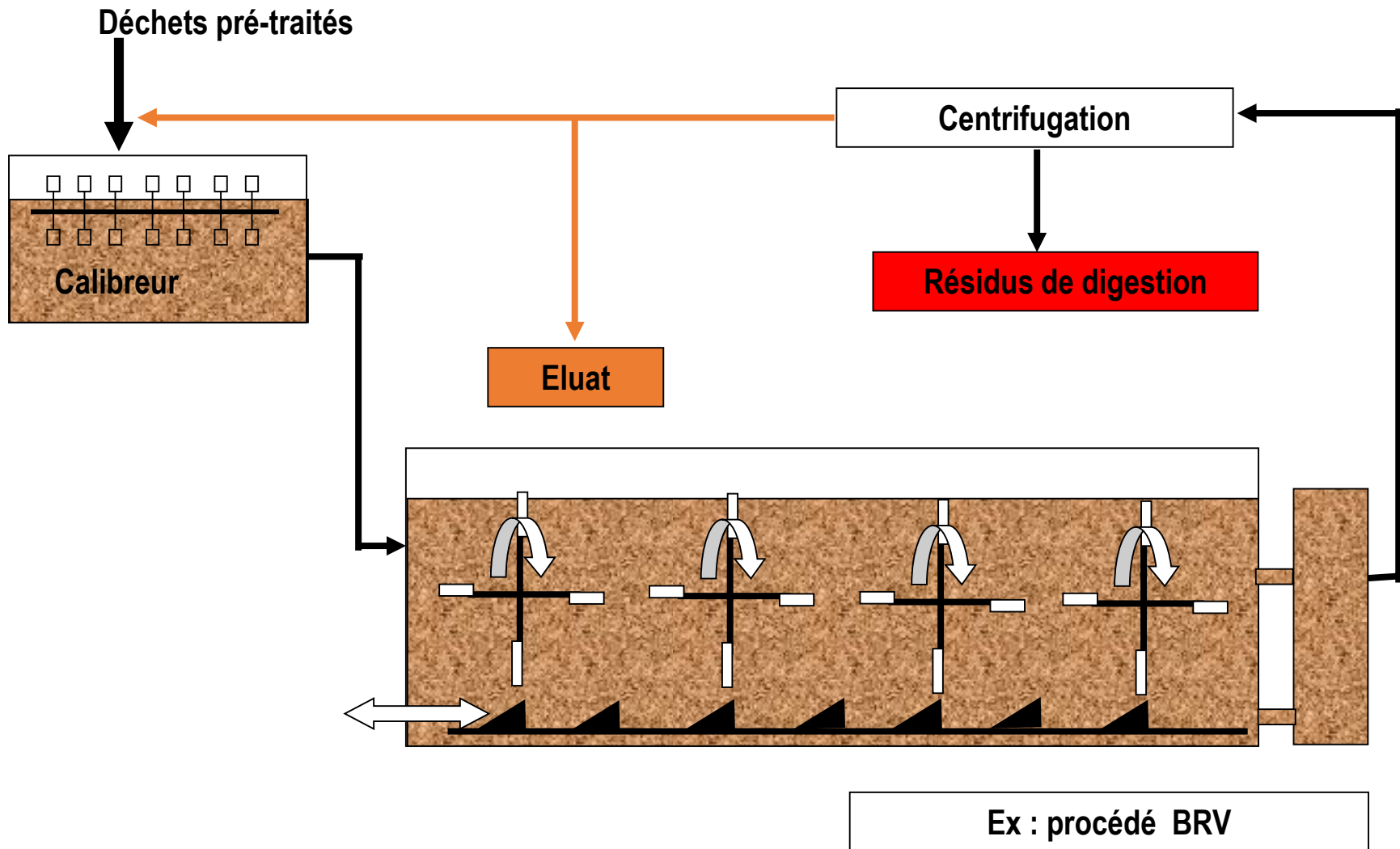


## ➤ Type de digesteurs voie solide

### Réacteurs de type piston

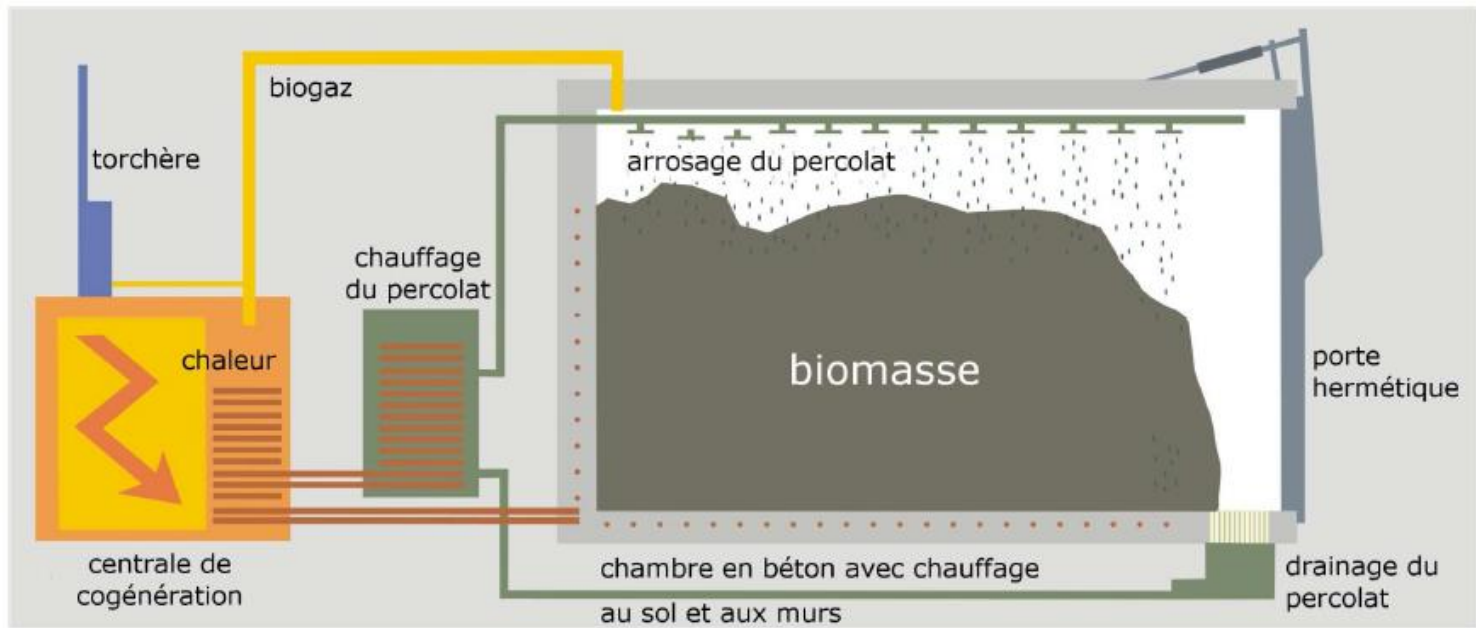


## ➤ Type de digesteurs voie solide



## ➤ Type de digesteurs voie solide

Fermentation « voie sèche » à la ferme



Bekkon, 2002



## ➤ Type de digesteurs voie solide

Fermentation « voie sèche » à la ferme

En Allemagne



Bekkon, 2007



En France, Gaec du Bois Joly  
(Vendée) : 30kWe

# ➤ Microméthanisation

Digestion locale des biodéchets

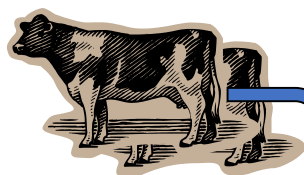
- Solutions containerisées

Exemples

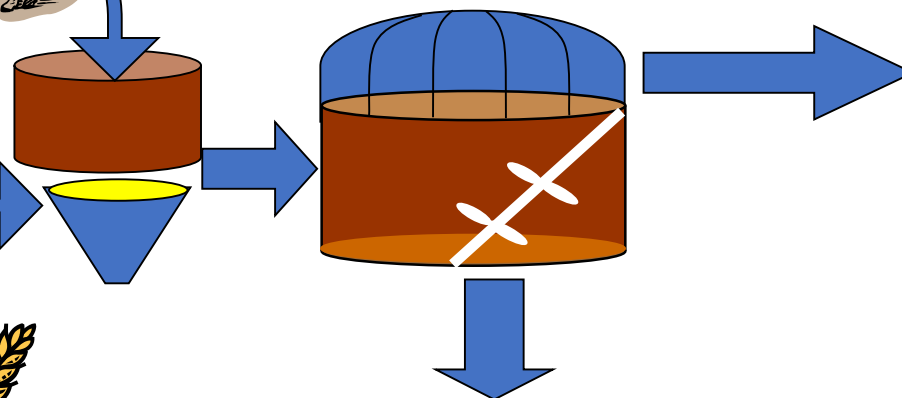


➤ La méthanisation : produits de la digestion anaérobie

Substrats



Réacteurs



Digestats



Biogaz



## ➤ La méthanisation : produits de la digestion anaérobie

### Biogaz

- Composition du biogaz

- Principalement constitué de  $\text{CH}_4$  combustible et de  $\text{CO}_2$  inerte
- D'autres gaz peuvent venir s'ajouter de façon minoritaire :  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$

$\text{CH}_4$  : 50 à 70%

$\text{CO}_2$  : 30 à 40%

$\text{H}_2\text{S}$  : 0,2 à 5%

$\text{N}_2$  : 0,2 à 3%

autres gaz : traces

- La teneur de ces gaz dépend étroitement de la composition du déchet traité et du degré d'avancement de la méthanisation

## ➤ La méthanisation : produits de la digestion anaérobie

### Biogaz

- Conditions de valorisation du biogaz

- Saturation en eau, présence de  $\text{CO}_2$  et de  $\text{H}_2\text{S}$  éventuels
  - corrosif !!
  - transport par des canalisations en polyéthylène haute densité ou en inox 316
- En amont de sa valorisation, a minima une étape de condensation de la vapeur d'eau.
- La désulfuration du biogaz par ajout d'oxydant (chimique ou biologique) est également une étape courante d'épuration.
- Pour des valorisations plus poussées (biocarburant, injection dans réseau) une épuration plus importante (élimination du  $\text{CO}_2$  par décarbonatation par exemple) est nécessaire afin de rendre la composition du gaz conforme et proche de celle du gaz naturel.



## ➤ La méthanisation : produits de la digestion anaérobie

### Biogaz

- Valorisation du biogaz



- Valorisation thermique












- Valorisation électrique : avec ou sans cogénération



- Biogaz carburant

Tableau d'équivalences pour 10000 kWh

Solaire	Bois déchiqueté	Bois bûche	Pellet vrac	Pellet sac	Gaz propane	Gaz naturel	Fioul domestique	Electricité
								
3.5 t = 15 m <sup>3</sup> <sup>(1)</sup>	2.45 t = 5 stères <sup>(2)</sup>	2 t = 3 m <sup>3</sup>	2 t = 3 m <sup>3</sup>	724 kg	1000 m <sup>3</sup>	1000 litres	10000 kWh	
1 kg = 2.20 kWh PCI à 2.80 kWh PCI	1 kg = 4.08 kWh PCI	1 kg = 4.90 kWh PCI	1 kg = 4.9. kWh PCI	1 kg = 13.800 kWh PCS	1 m <sup>3</sup> = 10 kWh PCI	1L = 9.90 kWh PCI		

(1) Taux humidité 40% (2) L'unité stère a été remplacée par le M3. PCI bois dur (charme, chêne, érable, eucalyptus, frêne, hêtre, orne) sec avec transport.

. N.B. Le pellet (nom d'origine anglaise) est le terme qui désigne le granulé de bois.



## ➤ La méthanisation : produits de la digestion anaérobie

Digestat

Intuitivement on devine que la composition des digestats  
va varier selon :

La diversité des substrats

Les paramètres du procédé ( $\theta^{\circ}\text{C}$ , TSH, taux de solide)

Les post-traitements appliqués



*Dans quelles mesures ?*

Nouvelle définition de digestats :

Résidus **solides ou liquides** issus du processus de  
méthanisation de la matière organique **et de différents**  
**post-traitements**

# ➤ La méthanisation : produits de la digestion anaérobie

## Digestat

- Composition moyenne (min-max) des digestats français (Ademe 2011, DIVA, Mafor, JRC)
  - pH basique (7 à 9)
  - Quantité d'azote forte si lisier porcin ou déchet IAA et faible si déchets verts
  - N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> = généralement 30 à 70% du NTK
  - Matière organique stabilisée (comparé aux intrants)
  - Peu de problèmes sanitaires (mais problèmes méthodologiques pour l'identification des entérocoques et *Clostridium perfringens*)
  - Pas ou peu de dépassement des seuils en HAP et PCB des digestats (même avec des boues urbaines)
  - Effet de concentration des ETM dans les digesteurs mais peu de dépassement des seuils, sauf Zn et Cu en Agricole
  - Problèmes récurrents d'inertes dans les digestats d'OMR d'usines TMB





## ➤ La méthanisation : produits de la digestion anaérobie

Digestat

- Digestats : épandage

- Caractéristiques physico-chimiques

- Forte teneur en azote minéralisé et pH plutôt élevé



risques de volatilisation de  
l'ammoniac important



Epannage avec rampe à pendillard et enfouissement rapide si possible!



## ➤ La méthanisation : produits de la digestion anaérobie

### Digestat - synthèse

- La dénomination « digestat » englobe de nombreux « produits » de composition variée, intermédiaire entre engrais et amendement
- La qualité des intrants méthanisés influence la composition des digestats bruts mais il existe un effet de lissage au niveau du procédé
- Les post-traitements modifient considérablement la partition des matières dans les digestats solides et liquides
- Les post-traitements existants et en développement offrent de fortes potentialités de transformation des digestats afin de les adapter à des utilisations spécifiques

#### Digestat brut ou liquide

- A proximité immédiate de l'installation
- A utiliser sans délai
- Précautions à l'épandage (volatilisation)
- Vérifier qu'il existe un matériel d'épandage adapté

#### Produits solides, humides

- A proximité de l'installation
- Facilement épandable
- Prouver la stabilité
- Valeur amendante ou fertilisante

#### Produits secs

- Stabilité → délai de conservation
- Transportables
- Valeur amendante ou fertilisante
- Précautions de formulation (poussières)

#### Produits minéraux

- Utilisation identique aux engrais de synthèse
- Concentration variable → distance d'exportation variable

# ➤ Compostage et méthanisation : des procédés complémentaires ?

