

 A vertical line of orange dots runs down the left side of the slide.

# TRANSFORMATION DES DÉCHETS POUR LEUR VALORISATION AGRICOLE

Jean Luc FARINET  
Chercheur au CIRAD - France

# SOMMAIRE

- Les voies de transformation des déchets organiques
  - Cas particulier de la fermentation alcoolique
- Processus anaérobie et aérobie
- La digestion anaérobie
  - Principe et co-produits
  - Techniques et procédés
- Le compostage
  - Principe et co-produits
  - Techniques et procédés
- Etudes de cas au Maroc et au Sénégal

# LES VOIES DE TRANSFORMATION

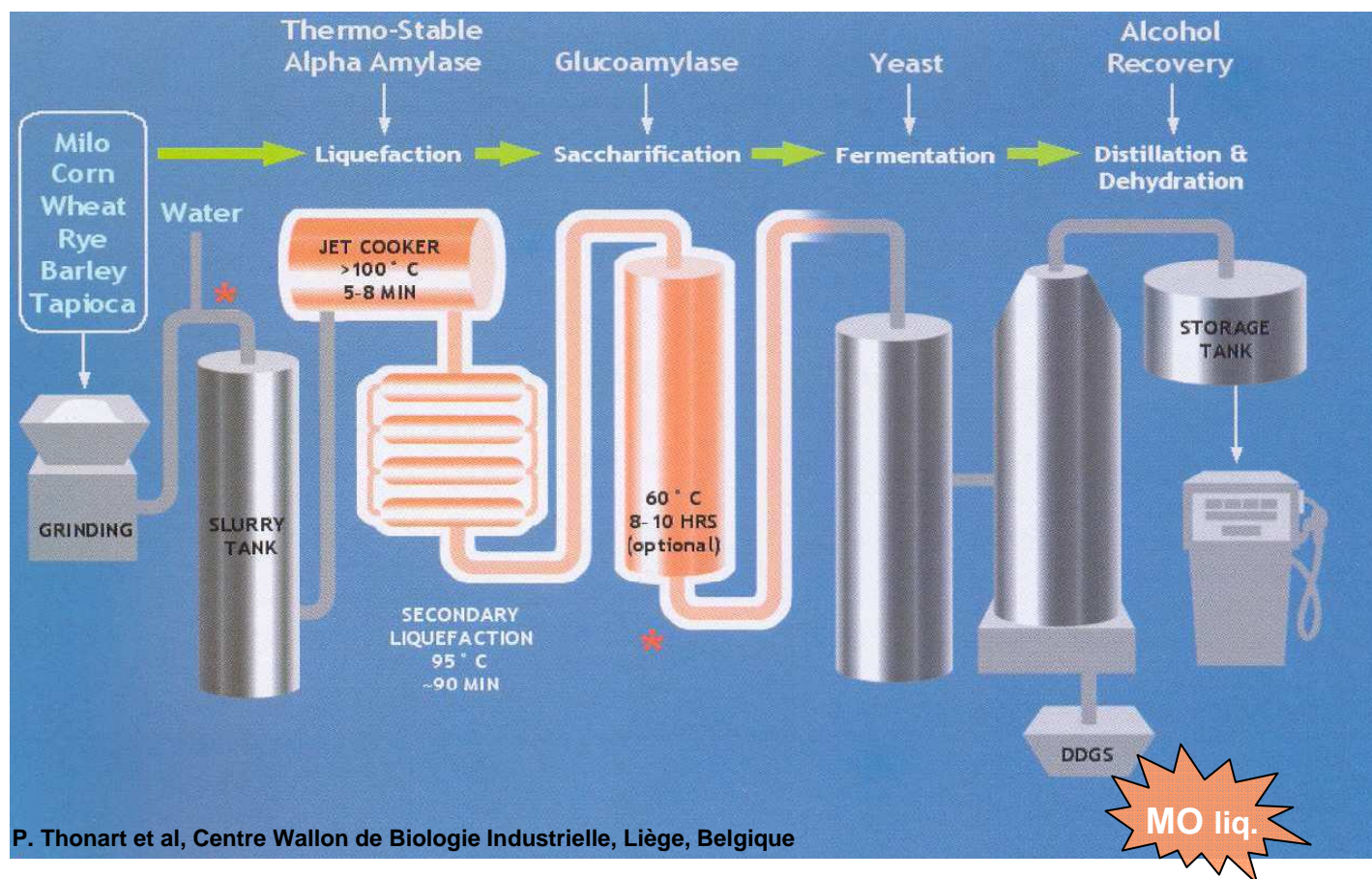
- La **fermentation** au sens large est la seule voie de transformation adaptée au recyclage des déchets organiques dans l'agriculture, car elle permet toujours l'obtention d'un **coproduit** destiné à l'amendement et la fertilisation des sols.
- 3 grands types de fermentation :
  - la fermentation alcoolique
  - la digestion anaérobie ou méthanisation
  - la fermentation aérobie ou compostage.
- L'obtention d'un compost de qualité nécessite pratiquement toujours une maturation finale des résidus de ces fermentations.

# LA FERMENTATION ALCOOLIQUE

- **Intérêt** : produire de l'énergie à partir des déchets.
- **Déchets traités** :
  - déchets à forte teneur en glucides (amidons et sucres libres), par exemple résidus végétaux de l'industrie sucrière
  - possibilité d'utiliser certains résidus végétaux tels que les rafles de maïs ou encore des papiers-cartons
  - surcoûts importants pour transformer des déchets lignocellulosiques qui exigent un prétraitement lourd destiné à éliminer la lignine.
- **Principe** :
  - hydrolyse enzymatique en milieu acide et filtration
  - fermentation à l'aide de levures
  - distillation
- **Co-produits** :
  - alcool
  - résidu de filtration
  - effluent de distillation
- **Développement** : filière peu développée actuellement, uniquement à l'état de projets pilotes pour les déchets lignocellulosiques.

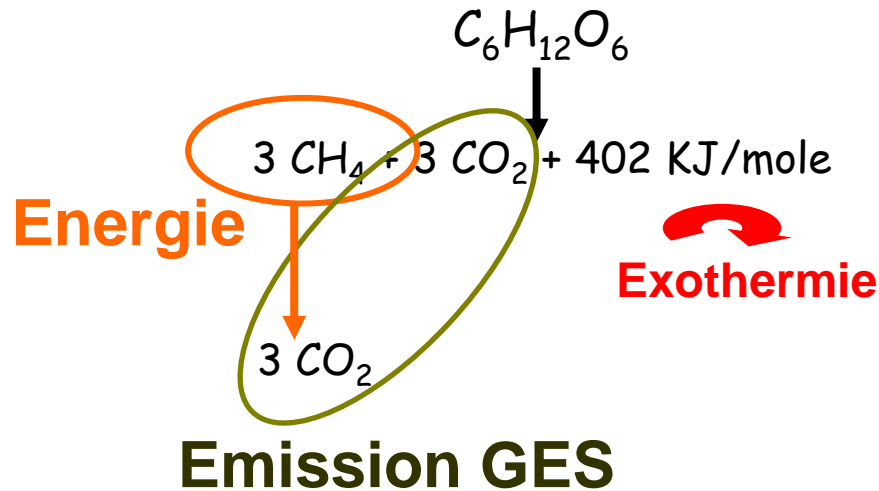
# LA FERMENTATION ALCOOLIQUE

- Principe industriel à partir de l'amidon

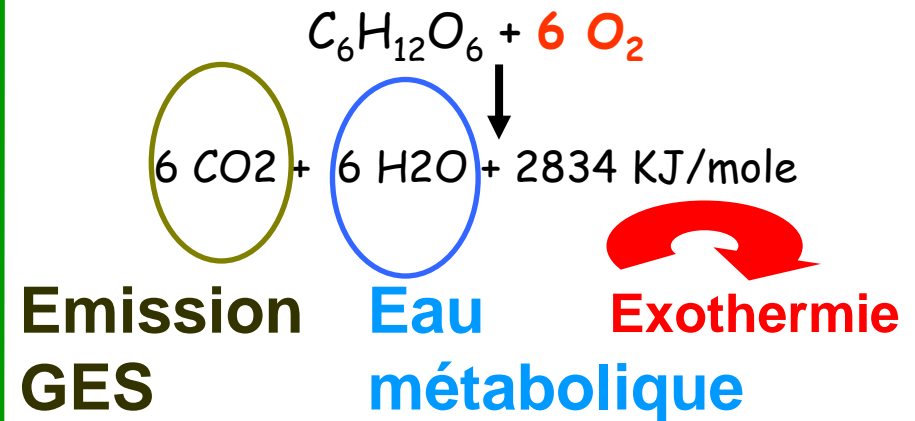


# PROCESSUS ANAÉROBIE ET AÉROBIE

- Anaérobie : en absence d'oxygène
- Méthanisation ou digestion anaérobie en réacteur fermé
- Combustion du carbone :



- Aérobie : en présence d'oxygène
- Compostage à l'air libre ou en réacteur ouvert
- Oxydation du carbone :



# LA DIGESTION ANAEROBIE

- **Intérêt** : stabiliser partiellement les déchets en produisant de l'énergie.
- **Déchets traités** : tous déchets riches en matière organique à dominante cellulosique.
- **Principe** : fermentation en 3 phases dans un réacteur, en absence totale d'oxygène et en présence d'une flore bactérienne mixte :
  - hydrolyse, par des bactéries fermentaires
  - acidogénèse, par des bactéries acidogènes (essentiellement acétogènes)
  - méthanogénèse, par des bactéries méthanogènes
- **3 plages de température possibles, engendrant chacune la présence d'une flore mixte adaptée:**
  - psychrophile (10 à 25°C)
  - mésophile (25 à 40°C)
  - thermophile (45 à 60°C)
- **Autres paramètres importants** : taux d'humidité minimum de 65%, rapport C/N optimal à 30-35, pH voisin de la neutralité.

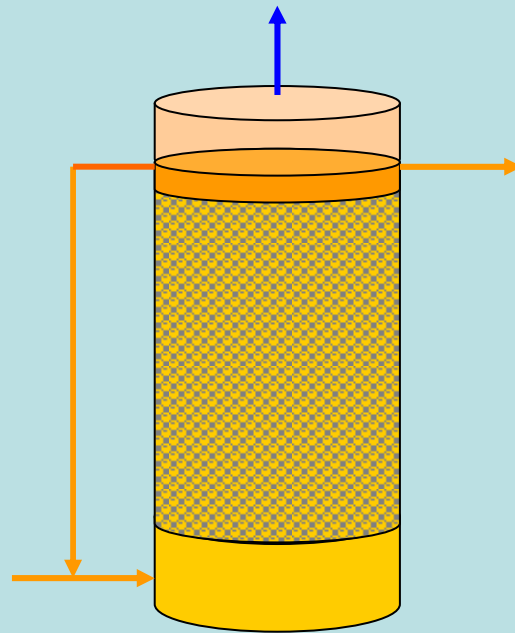
- **1<sup>er</sup> co-produit** : le biogaz
  - 50 à 75% de méthane, selon les déchets traités et le régime de fermentation
  - 25 à 50% de  $CO_2$  , traces  $NH_3$ ,  $H_2S$ ,  $H_2$  ,...
  - Pouvoir calorifique (PCI) : 4250 à 6400 kcal/m<sup>3</sup>
  - 1 m<sup>3</sup> biogaz  $\approx$  0,5 l gasoil  $\approx$  0,8 kg charbon  $\approx$  0,5 kg butane
- **Théoriquement** :
  - 0,35 m<sup>3</sup>  $CH_4$ /kg DCO
  - max. 1,10 m<sup>3</sup>  $CH_4$ /kg MO
- **Utilisation** : à l'état brut si peu d' $H_2S$  :
  - Combustible pour la production d'énergie thermique
  - Biocarburant pour l'alimentation de moteurs à poste fixe



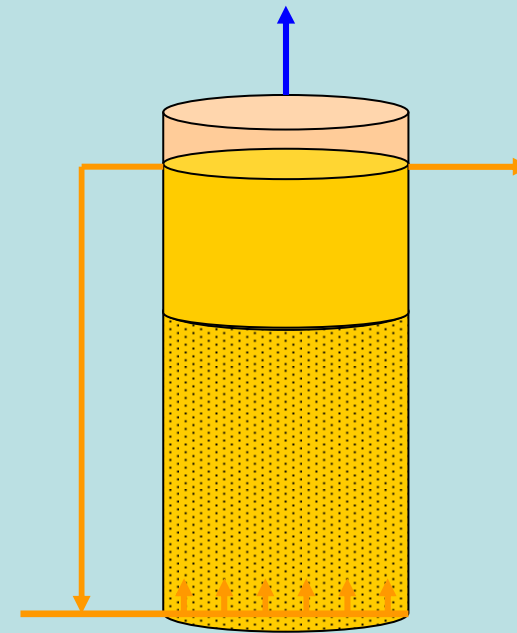
# LA DIGESTION ANAEROBIE

- **2<sup>nd</sup> co-produit** : le digestat ou méthanisat
  - Parfois utilisé directement comme engrais organique en grandes cultures (déjections animales) ou comme aliment piscicole (Asie).
  - Plus souvent séparé en :
    - une fraction solide qui devra subir une maturation aérobie pendant 1 à 3 mois pour devenir un compost.
    - une fraction liquide, recyclée en tête mais dont l'excédent doit être épandu ou épuré en cas de rejet.
- **Développement** : cantonné à un usage agricole dans les années 80 ; maintenant en pleine phase de maturité pour la valorisation de la FFOM, des déchets agricoles et agro-industriels.

# LA DIGESTION ANAEROBIE



- Biomasse fixée
  - Filtre anaérobie

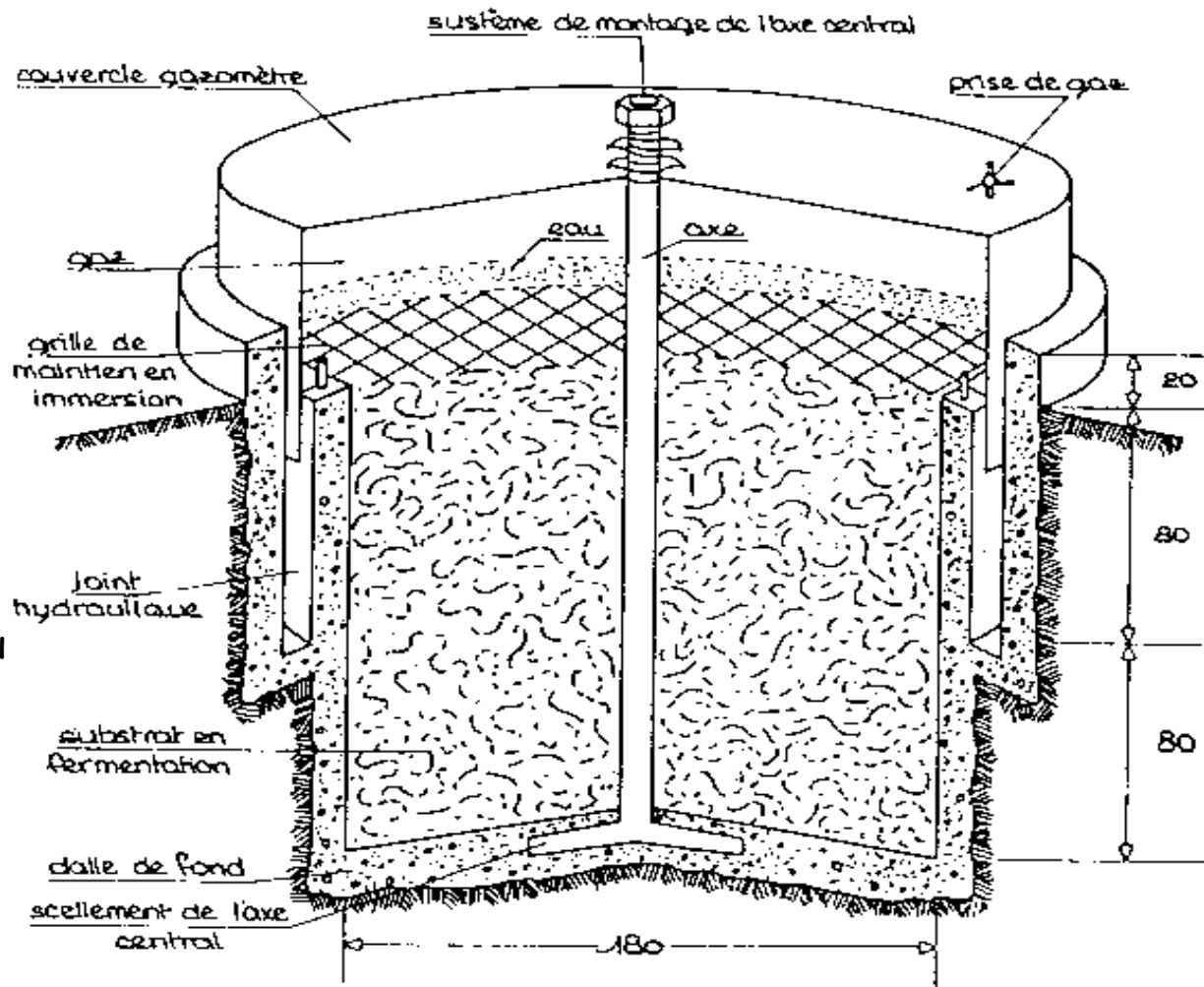


- Lit fluidisé

## Digesteur discontinu Version enterrée à dôme mobile.

3 digesteurs parallèles pour une production constante de biogaz.

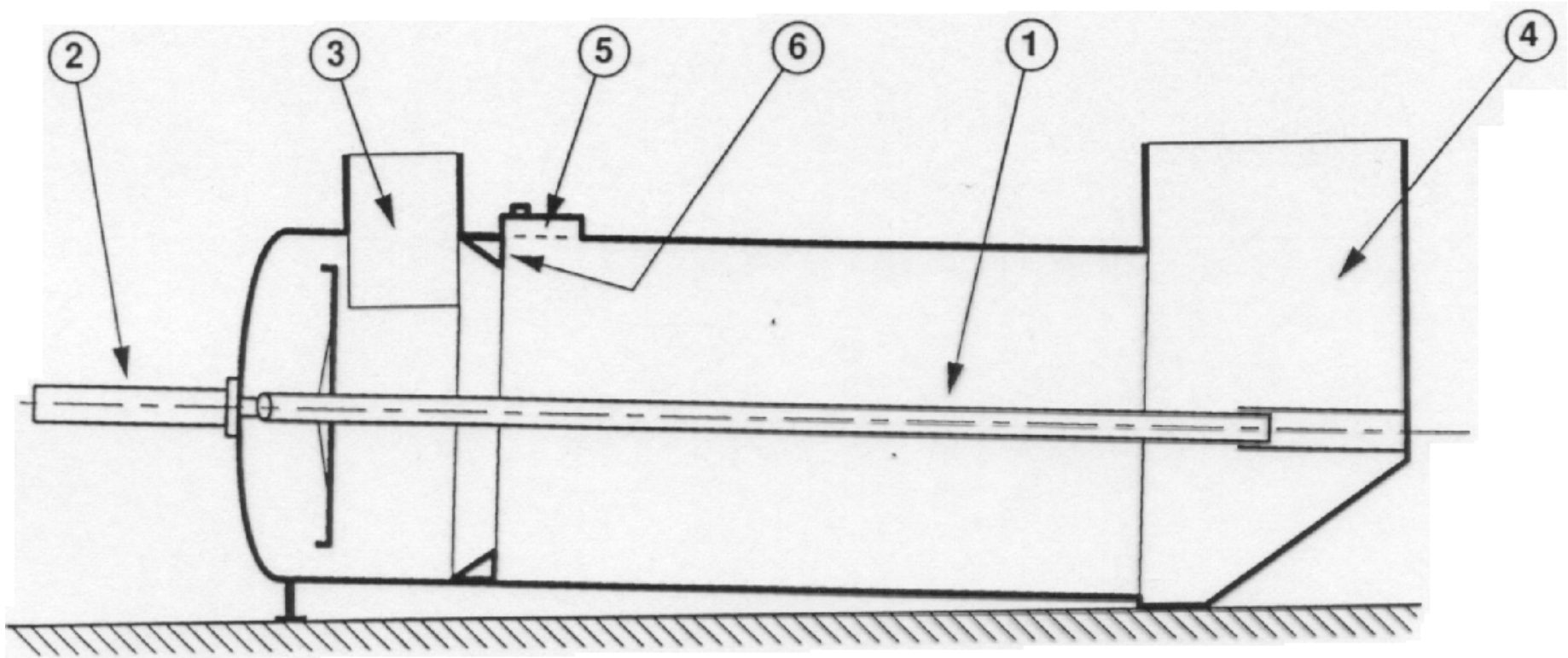
Chargement/déchargement total d'un digesteur tous les 15 à 20 jours, manuellement ou mécaniquement.



# LA DIGESTION ANAEROBIE

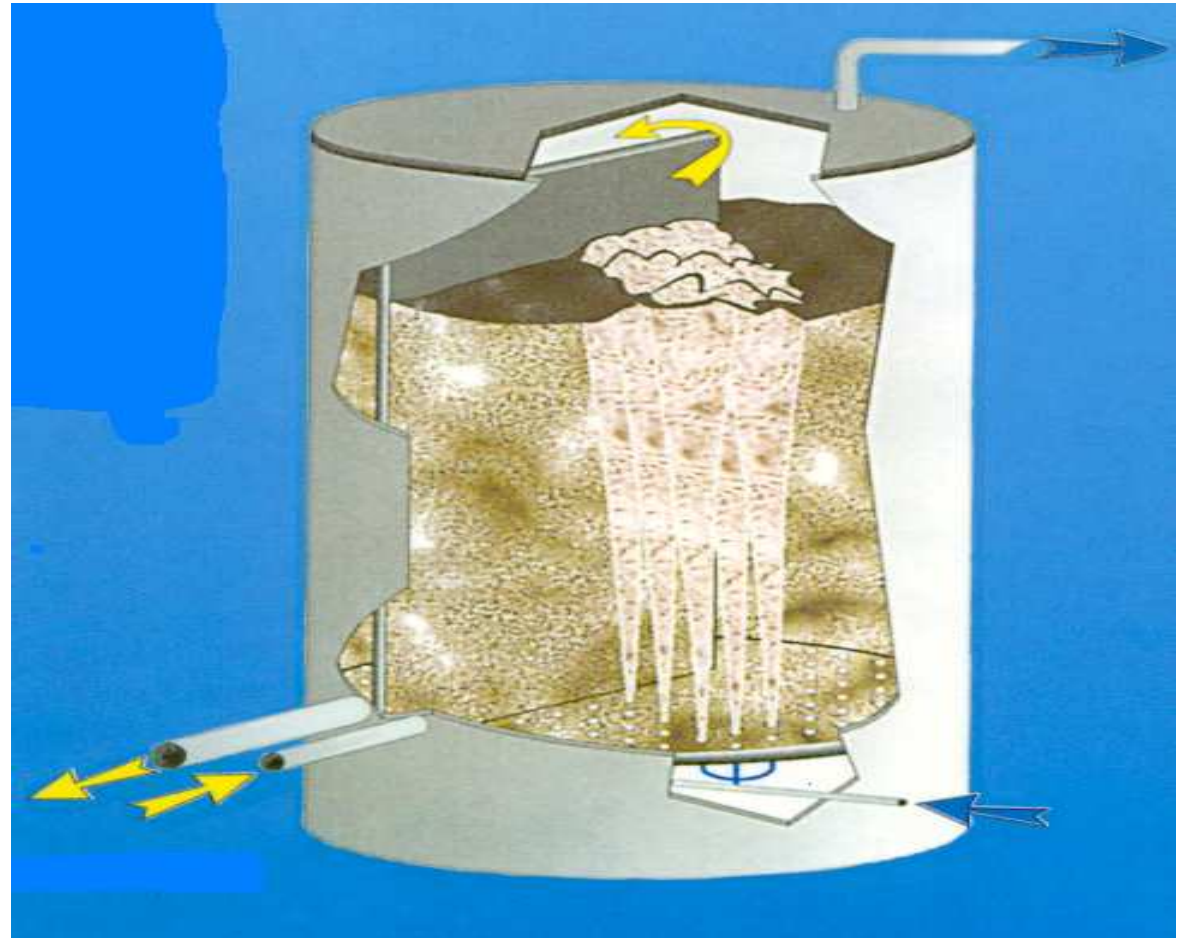
## Digesteur TRANSPAILLE

- Matières en immersion dans un liquide permanent,
- Avancement des matières par dispositif mécanique, pour de petites capacités de traitement (max. 500 kg MST/jour).



## Digesteur VALORGA

- Matière rendue pâteuse par broyage/dilution
- Avancement des matières par injection de biogaz sous pression,
- Pour de grandes capacités de traitement.



# LE COMPOSTAGE

- **Intérêt** : stabiliser, hygiéniser et réduire le volume des déchets.
- **Déchets traités** : tous déchets ligno-cellulosiques ; les déchets pâteux doivent être mélangés avec un matériau structurant (paille, copeaux, etc.)
- **Principe** : fermentation aérobie en réacteur ou à l'air libre avec 3 phases successives :
  - phase de latence : colonisation du milieu par les micro-organismes (environ un jour);
  - phase de fermentation chaude : d'abord mésophile, puis thermophile (60-70°C) sous l'effet de la réaction exothermique, auto-régulation de la température par l'équilibre entre production et perte de chaleur;
  - phase de refroidissement et maturation : termine le processus jusqu'à la raréfaction des matières facilement utilisables par les micro-organismes. Le compost est alors apte à un usage agricole.

# LE COMPOSTAGE

↓ Paramètres importants :

- taux O<sub>2</sub> : 5% mini, taux d'espace lacunaire de 30 à 40%
- taux d'humidité : 55 à 70%
- C/N : 20 à 70 ; optimal à 30-35
- pH : voisin de la neutralité au départ

↓ La température est un indicateur de fonctionnement.

- **Produit** : un seul, le compost, dont la production finale est de l'ordre de 45 à 55% du tonnage initial de déchets (en brut).

Plusieurs stades de finition :

- amendement des sols : phase de maturation de 1 à 2 mois
- support de culture : maturation prolongée (jusqu'à 12 mois)

- **Développement** :

- essentiellement pour valoriser les déchets verts, la FFOM, les déchets agricoles et agro-industriels

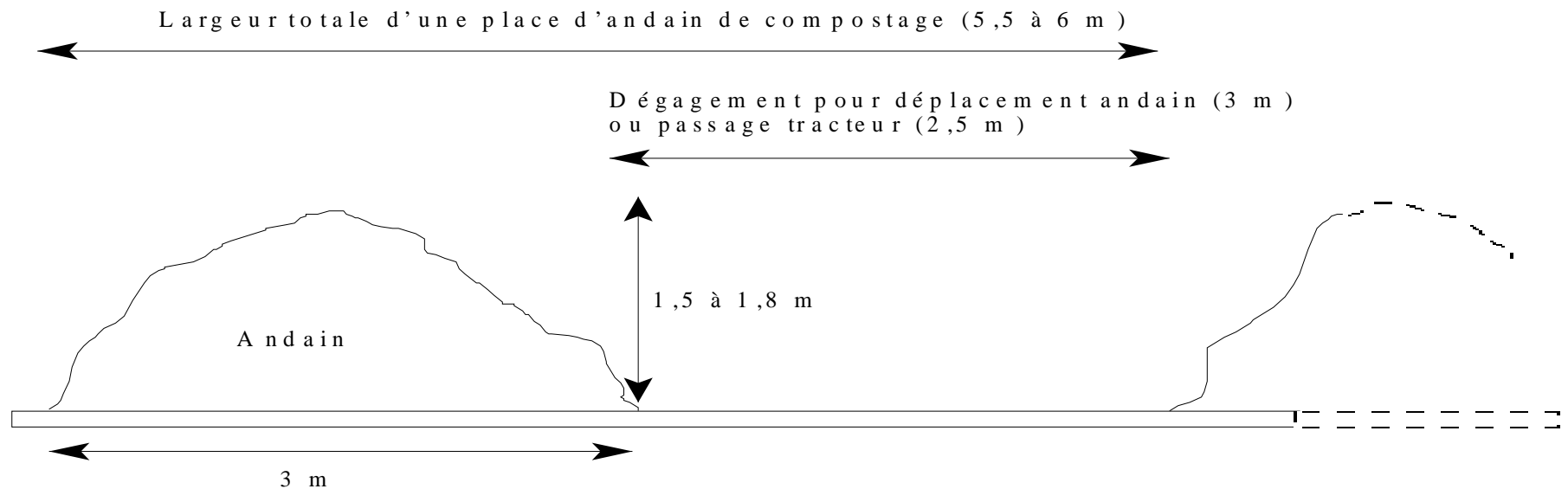
# LE COMPOSTAGE

- **Technologies :**
  - 3 types de procédé de compostage qui se différencient uniquement par la conduite de la phase de fermentation chaude :
    - le compostage extensif en andains retournés
    - le compostage intensif en aération forcée
    - le compostage industriel en réacteur
  - Un cas particulier : le lombri-compostage
  - En amont : tri, broyage, mélange, etc...
  - En aval : criblage, épierrage, ensachage, etc...



# LE COMPOSTAGE EN ANDAINS

- Oxygénation par retournement périodique, manuel ou mécanique;
- Durée fermentation chaude : 1,5 à 2 mois pour la FFOM;
- Etanchéité au sol, récupération/recyclage des jus, toiture suivant la pluviométrie.



➔ **Avantages** : simplicité, faible coût pour les petites unités

➔ **Inconvénients** : emprise foncière, beaucoup de manipulations, nuisances

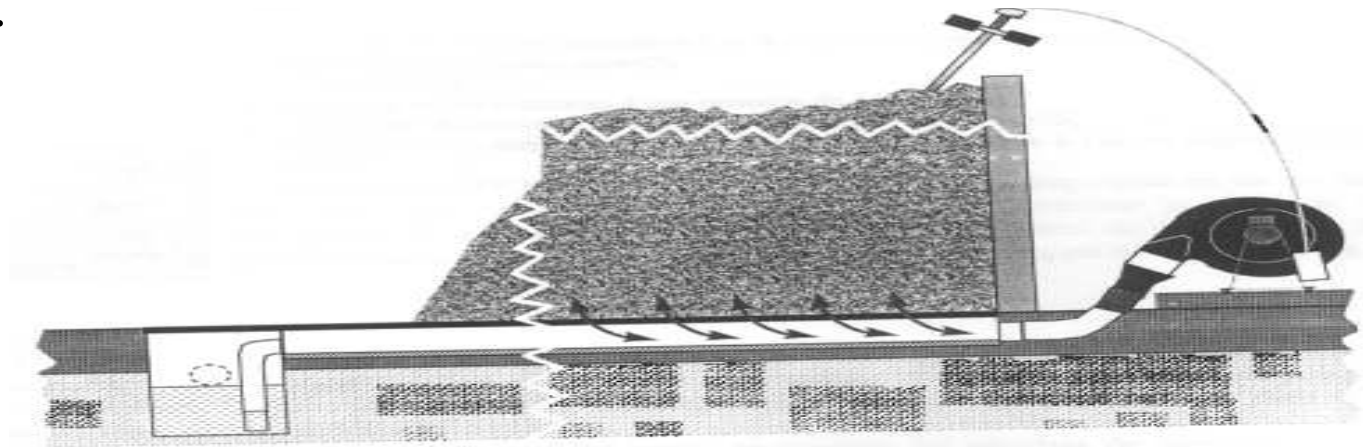
# LE COMPOSTAGE EN ANDAINS



Transformation des déchets pour leur valorisation agricole / JL. Farinet

# LE COMPOSTAGE INTENSIF EN AERATION FORCEE

- Oxygénation par insufflation/aspiration d'air dans des andains de grande largeur (jusqu'à 6 m);
- Durée fermentation chaude : 3 à 4 semaines pour la FFOM;
- Etanchéité au sol, récupération/recyclage des jus, toiture suivant la pluviométrie.



- ➔ Avantages : emprise foncière réduite, coût peu élevé, peu de manipulations;
- ➔ Inconvénients : importance du structurant, hétérogénéité du compost, consommation d'énergie, nuisances.

# LE COMPOSTAGE INDUSTRIEL EN RÉACTEUR

- Oxygénation, humidification, température et apports de nutriments entièrement contrôlés et automatisés;
- Durée fermentation chaude : 15 à 20 jours pour la FFOM;
- Bâtiments et technologies industriels.



→ Avantages : emprise foncière très réduite, contrôle total, homogénéité, pas de nuisance

→ Inconvénients : technicité, coût élevé, consommation d'énergie.

# LE LOMBRI-COMPOSTAGE

- Après une phase initiale de fermentation aérobie ou anaérobie, transformation en couche mince en utilisant des vers adaptés qui dégradent par ingestion la matière organique;
- Durée sur FFOM :
  - Fermentation aérobie chaude en andains : 1,5 à 2 mois,
  - Travail des vers : 2 mois minimum
  - Maturation : 1 mois.
- Pour les OM brutes, possibilité de faire faire le tri par les vers : les matériaux indésirables (non ingérables) se concentrent à la surface de la couche et le compost peut être soutiré à la base.
  - ➔ Avantages : homogénéité, qualité du produit final;
  - ➔ Inconvénients : emprise foncière énorme, technicité de l'élevage des vers sous climat chaud et sec.

## CRITÈRES DE CHOIX D'UNE TECHNIQUE DE COMPOSTAGE DE LA FFOM À ESSAOUIRA, MAROC

- **Données de base issues d'une étude de faisabilité réalisée en 1998 :**
  - Ville d'Essaouira : 70 000 habitants en moyenne sur l'année, pointe à 100 000 habitants de juin à août
  - Quantité d'OM collectée : 22 000 t/an
  - FFOM après tri : 12 300 t/an, soit 56% du tonnage OM
  - Potentiel d'écoulement du compost sur la zone estimé à 4600 tonnes/an

## CRITÈRES DE CHOIX D'UNE TECHNIQUE DE COMPOSTAGE DE LA FFOM À ESSAOUIRA, MAROC

- **Options de transformation et valorisation :**  
Sur la base d'une technique de compostage en andains retournés, 2 alternatives ont été étudiées pour les opérations de transfert de matières (transport/chargement, andainage, retournement, stockage) :
  - travail manuel (pelles, brouettes),
  - mécanisation (tracto-pelle, remorques).
- **Bilan final :**
  - En terme d'emplois :
    - exploitation manuelle : un chef de centre, 5 chefs d'équipe, 75 manœuvres;
    - exploitation mécanisée : un chef de centre, 2 conducteurs, 11 manœuvres.
  - En terme de coûts :
    - exploitation manuelle : 7,62 €/tonne FFOM
    - exploitation mécanisée : 2,90 €/tonne FFOM

UNE POLITIQUE EN FAVEUR DE L'EMPLOI PREND VITE DES PROPORTIONS IMPRESSIONNANTES EN TERME DE COÛT LORSQUE LA TAILLE DES UNITÉS DE TRANSFORMATION AUGMENTE.

# ETUDE DE CAS AU SÉNÉGAL

## CRITÈRES DE CHOIX D'UNE FILIÈRE DE TRANSFORMATION DE LA FFOM À BAKEL, SÉNÉGAL

- **Données de base issues d'une étude pilote sur 2 ans (1994/96) :**
  - Ville de Bakel : 10 000 habitants, 650 concessions
  - Quantité d'OM collectée : 2500 t/an dont 2190 t/an FFOM
- **Options de transformation et valorisation :**
  - Volet commun : mise à disposition de poubelles, collecte par charretiers sous contrat, tri manuel, incinération de la fraction combustible, mise en décharge de la fraction non recyclable ;
  - Option 1 : FFOM compostée classiquement en andains sur une durée totale de 3 à 4 mois :
    - production de compost : 1600 t/an
  - Option 2 : FFOM débarrassée des fines (soit 690 t/an) est méthanisée et on ré-incorpore ensuite les fines pour la phase finale de compostage en andains sensiblement identique à l'option 1 :
    - production de biogaz : 66 240 m<sup>3</sup>/an, dont 15% autoconsommés
    - production de compost : 1600 t/an



# ETUDE DE CAS AU SÉNÉGAL

## CRITÈRES DE CHOIX D'UNE FILIÈRE DE TRANSFORMATION DE LA FFOM À BAKEL, SÉNÉGAL

- **Hypothèses de prix de vente des co-produits :**
  - compost vendu aux maraîchers à un prix plancher de 15 000 FCFA/tonne;
  - biogaz comprimé à basse pression et distribué dans un quartier proche à un prix de vente de 245 FCFA/m<sup>3</sup> établi sur la base du prix réel du butane commercial, hors subvention de l'Etat.
- **Bilan de l'étude de faisabilité :**
  - Coût Volet commun : 6 700 FCFA/t.OM ou 25 700 FCFA/concession.an
  - Coût Option 1 : nul, la vente du compost couvre les coûts
  - Coût Option 2 : 2 300 FCFA/t.OM ou 8 800 FCFA/concession.an.

LE RESULTAT EST CLASSIQUE DANS LE SECTEUR DES ENERGIES RENEUVELABLES AVEC UN COUT D'INVESTISSEMENT ELEVE. CE SERAIT LE PRIX D'UNE CONTRIBUTION A LA LUTTE CONTRE LA DEFORESTATION.

# A RETENIR

- **Aucune filière de transformation n'est rentable en soi :**
  - la vente des co-produits permet au mieux (rarement) de couvrir les coûts d'amortissement et de fonctionnement.
- **Digestion anaérobie et compostage permettent d'obtenir un compost de qualité similaire.**
- **Par rapport au compostage, la digestion anaérobie a certains avantages :**
  - elle permet la production d'un gaz combustible qui peut être valorisé;
  - elle évite le recours à des matériaux structurants;
  - par rapport aux techniques classiques de compostage (andain retourné ou aération forcée), elle limite les nuisances et son emprise foncière est réduite.
- **Par contre, elle a aussi 2 inconvénients majeurs :**
  - un coût d'investissement élevé et une certaine complexité technologique, tant au niveau de la méthanisation en continu elle même, qu'au niveau du stockage et de l'utilisation du biogaz produit;
  - elle implique de trouver un utilisateur du biogaz proche du site et capable d'absorber la totalité de la production à un prix qui puisse assurer la rentabilité de l'opération.

A vertical decorative line on the left side of the slide, composed of small orange dots.

MERCI DE VOTRE ATTENTION