



Section interrégionale de  
Haute et Basse-Normandie

**Journée scientifique et technique**  
**OPTIMISATION DU TRAITEMENT BIOLOGIQUE**  
**DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DES DÉCHETS NON DANGEREUX**

**ZOOM SUR LA TECHNIQUE DU BIORÉACTEUR**

**Les différents traitements biologiques**  
**de la matière organique des déchets**

**Emmanuel ADLER, Professeur à l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris**  
**animateur du groupe de travail « gestion biologique des déchets » de l'ASTEE**  
**[emmanuel.adler@eivp-paris.fr](mailto:emmanuel.adler@eivp-paris.fr)**



# Les différents traitements biologiques de la matière organique des déchets



**A- Qu'est-ce que la matière organique ?**

**B- Finalités des traitements biologiques**

**C- Typologie des traitements biologiques**

**D- Perspectives**

# Auscultier les immondices : une attitude courageuse



une poubelle,  
c'est pas pire  
qu'un pot !

consultation des vidanges par le médecin  
(gravure de Pigal en 1825)



# A1- Qu'est-ce que la matière organique ?

➤ une composition chimique *organique*

= C,H,O,N,S + P, K...

➤ une teneur en eau non négligeable

➤ une relative biodégradabilité/putrescibilité

déchet biodégradable -> dégradable par voie BIOLOGIQUE

bactéries (*ou autres*) + déchet biodégradable -> CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O

biodégradabilité = **notion toute relative**

(composition du déchet, prétraitements, température et humidité, redox, cinétique...)

Le polyéthylène, organique par sa composition, élaboré à partir de substrat biodégradable (le pétrole) n'est pas biodégradable

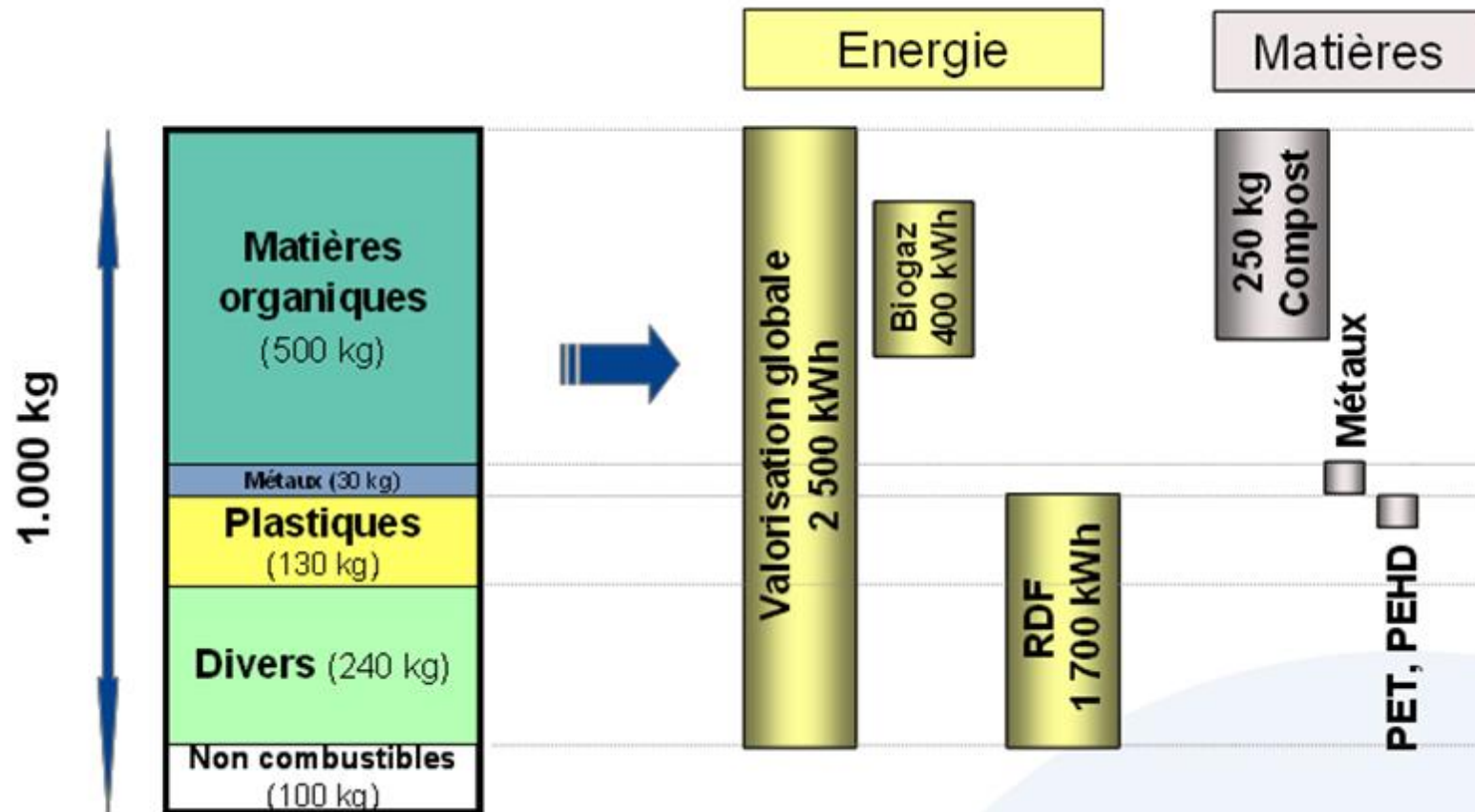
**Dans les ordures : Matière Organique Non Synthétique (MONS)**





## A2- La matière organique des OMR

- la matière organique biodégradable n'est pas pure
- La matière organique a un pouvoir énergétique
- la préparation de la matière organique des déchets peut permettre de valoriser les emballages à valeur ajoutée



## B- Finalités des traitements biologiques



**1- fabriquer du compost de qualité « produit », c'est-à-dire conforme à la norme NFU44051,**

**2- valoriser l'énergie du biogaz et le PCI des combustibles de substitution recyclés,**

**3-valoriser sous forme matière les recyclables (verre, métaux, plastiques... ),**

**4- fabriquer du déchet ultime pour stockage en ISDND / réduire le volume et le pouvoir de nuisances des ordures,**

# C- Typologie des traitements biologiques des déchets

1- Épuration biologique naturelle par le sol  
bioréacteur (décharge contrôlée)

2- Procédés biologiques artificiels

- **Compostage** (processus microbologique en présence d'air)

Déchets + O<sub>2</sub> + micro-organismes → CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + **chaleur** + COMPOST

- **Méthanisation** (processus microbologique en absence d'air)



3- Autres filières (pour mémoire)

- **Ressource nutritive** (digeste) pour alimentation animale (fruits, légumes, restes alimentaires, produits du grain, lactosérum...).
- **Traitements chimiques**
- **Combustion directe** (faible humidité) - chaudières, incinération...





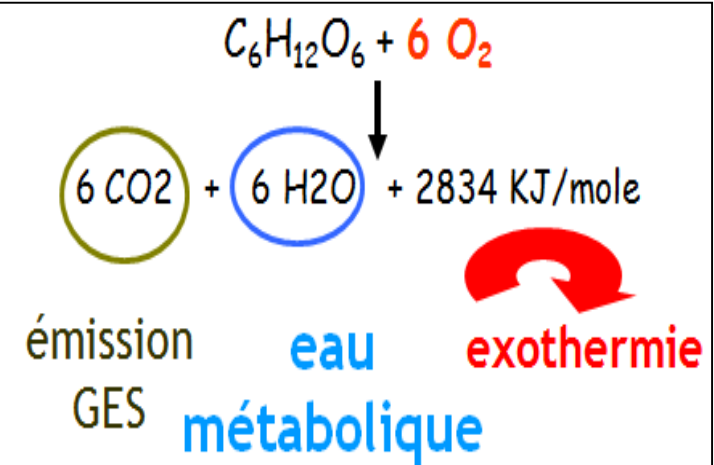
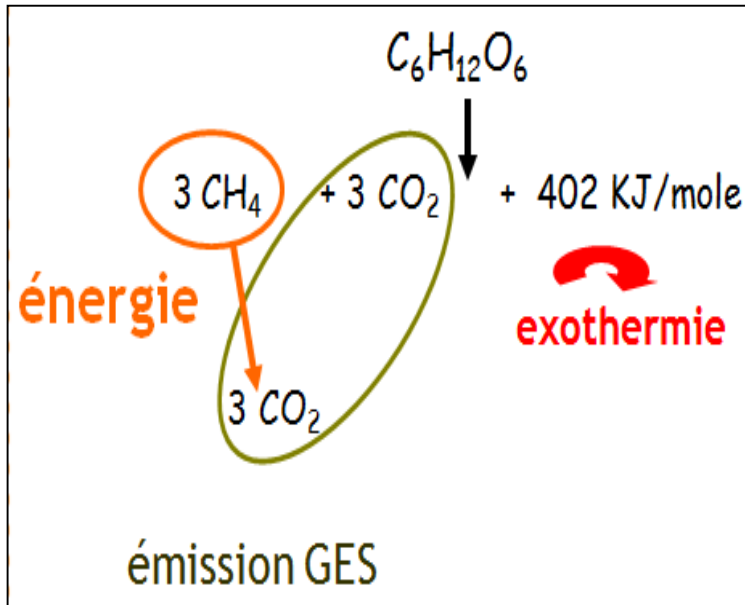
# C- Typologie des traitements biologiques

- Anaérobie : absence d'O<sub>2</sub>
- Méthanisation / digestion anaérobie réacteur fermé

- Aérobie : présence d'O<sub>2</sub>
- Boues activées, biofiltres aérés
- Compostage à l'air libre ouvert ou fermé/ventilé

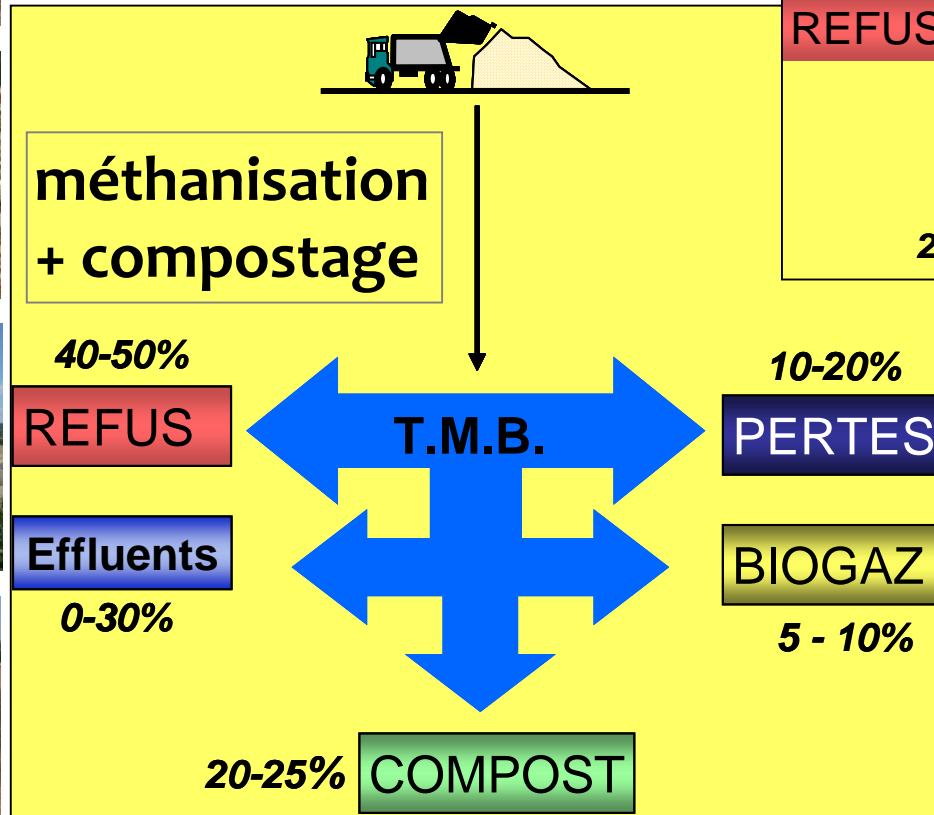
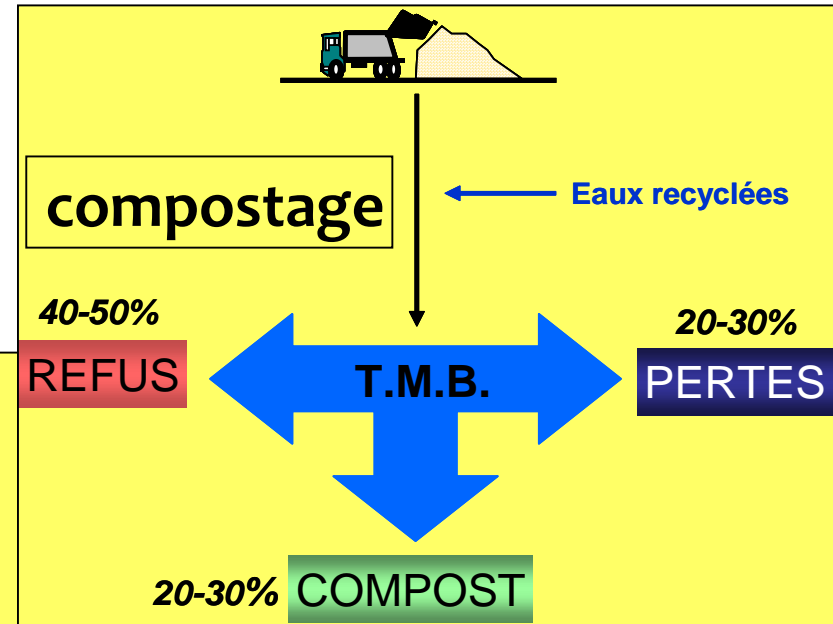
Combustion du carbone :

Oxydation du carbone :



# C- Typologie des traitements biologiques

## Comparaison du bilan masse



# C- Typologie des traitements biologiques

## Comparaison des procédés

### - intensif / extensif

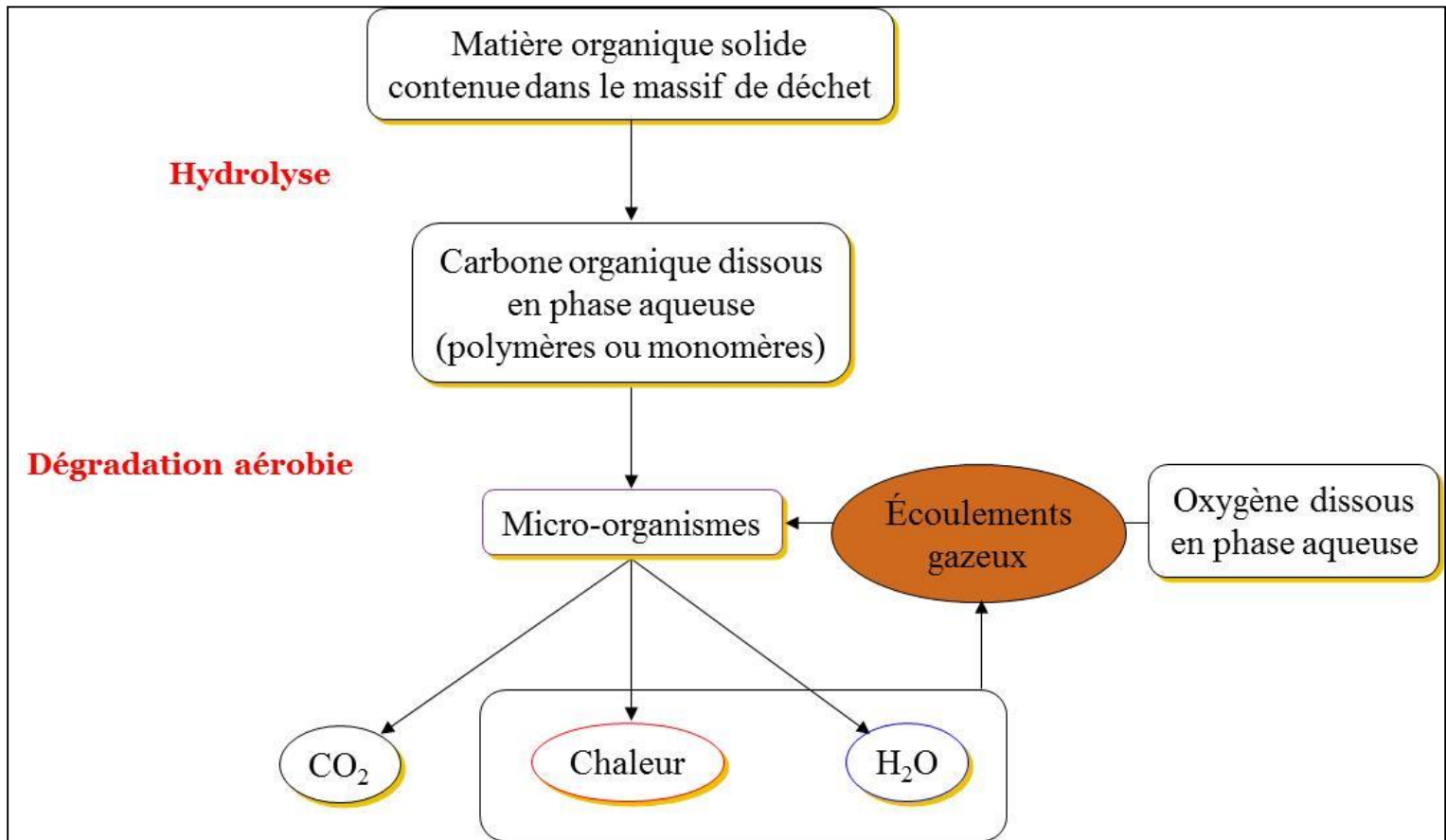


### - discontinu / continu

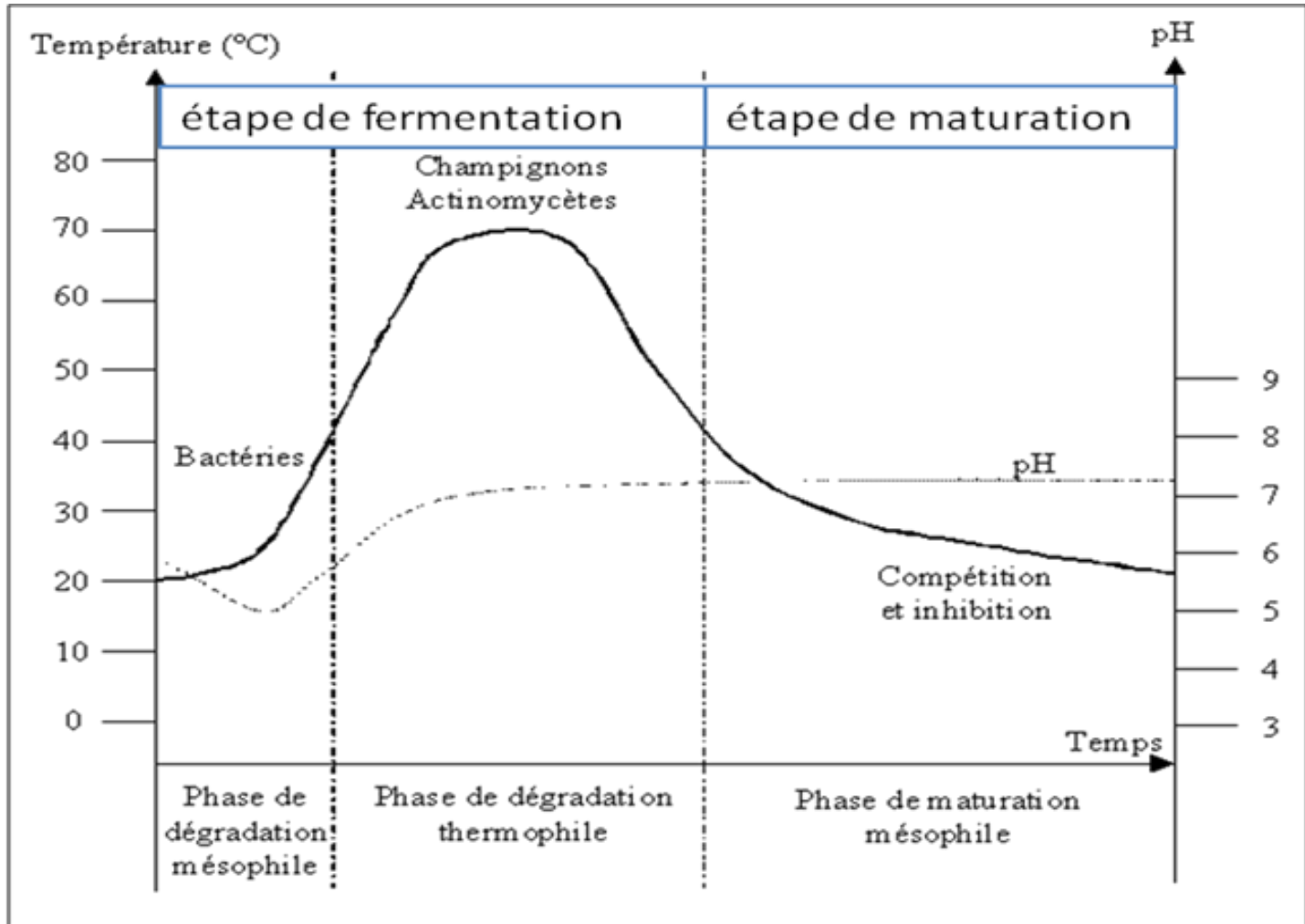




# C1- Le process de compostage

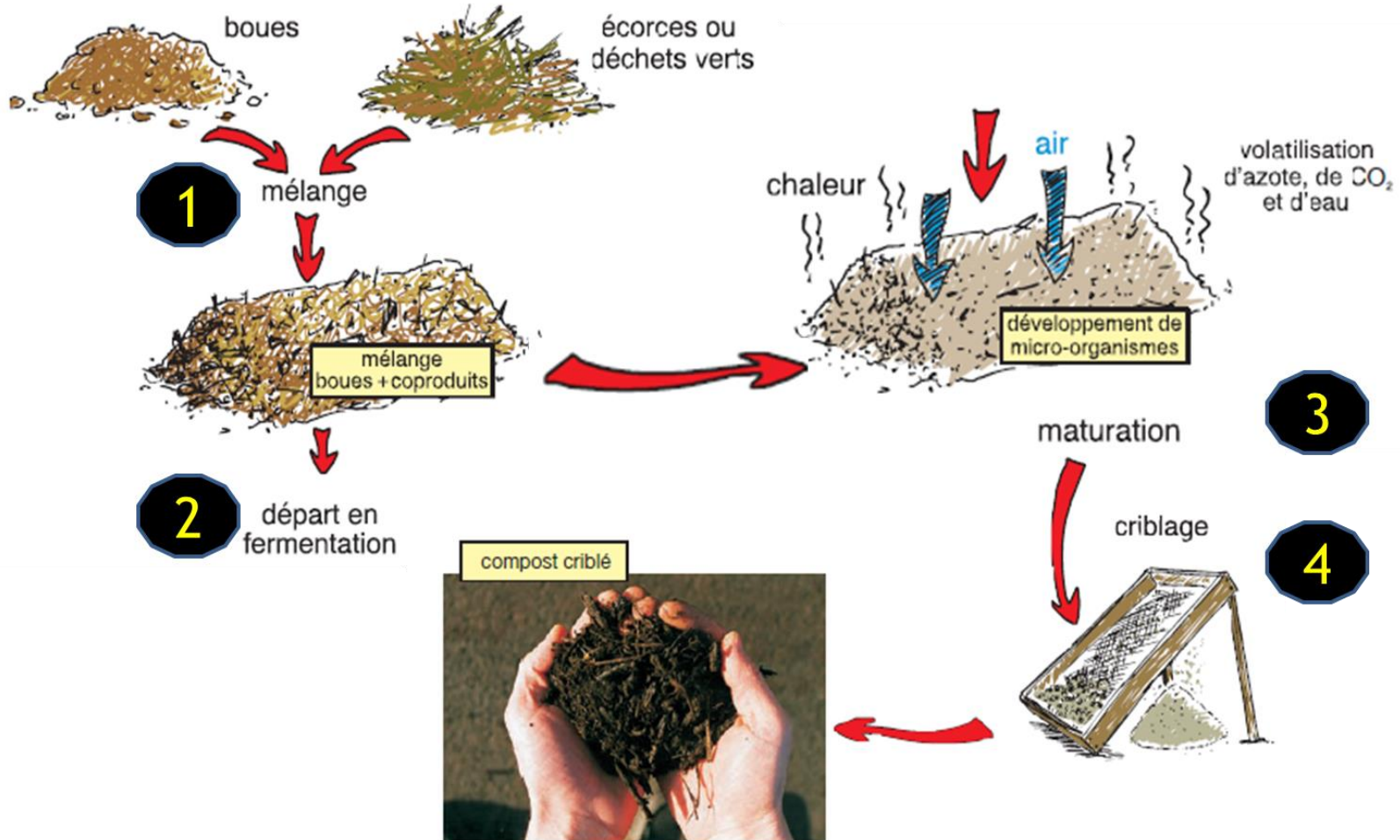


# C1- Le process de compostage



évolution de la température  
et du pH au cours du compostage

# C1- Le process de compostage





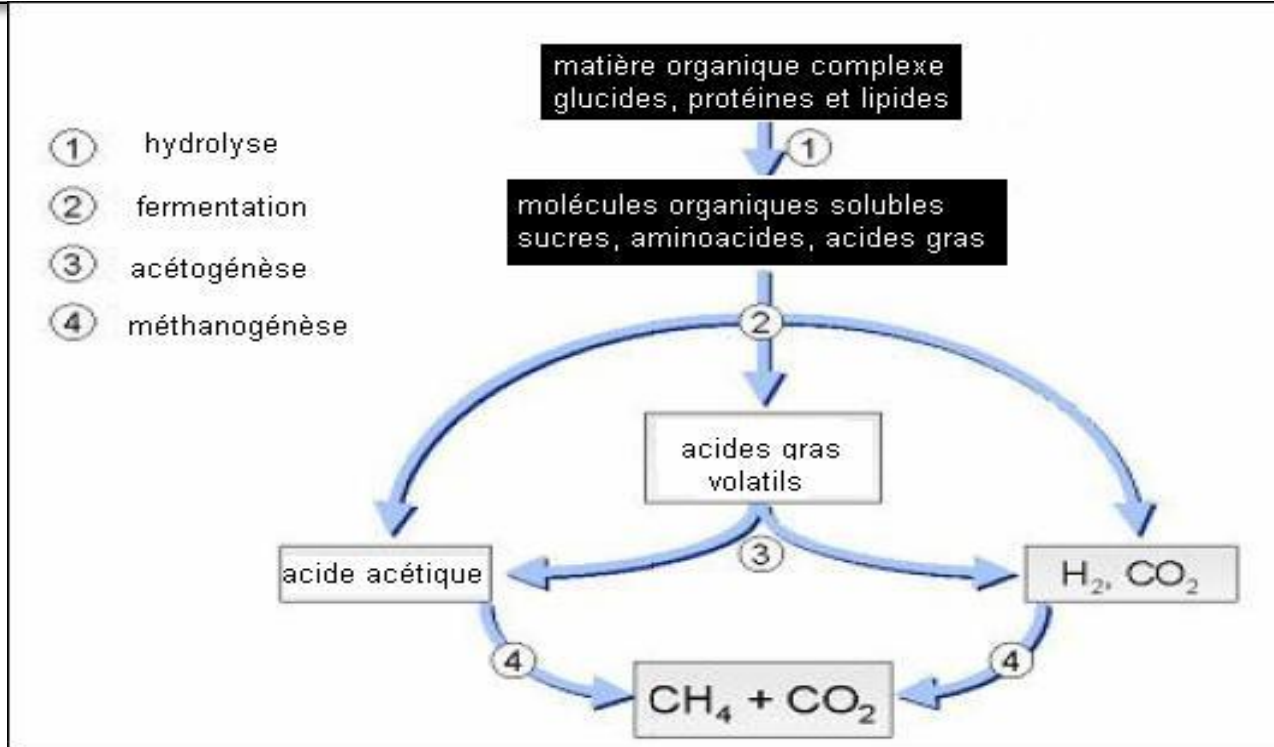
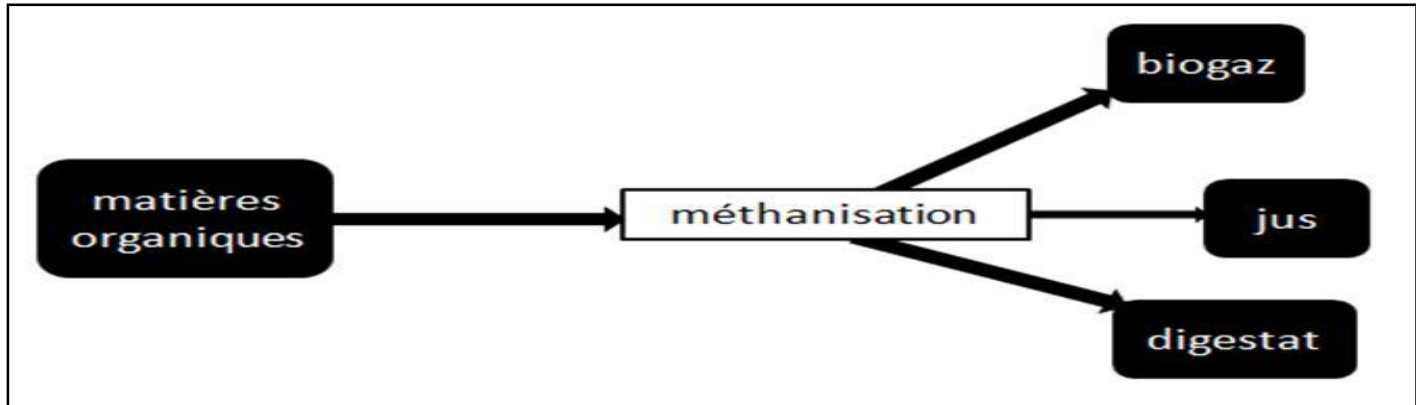
# C1- Le process de compostage



Procédés de compostage	Process
par retournements	<ul style="list-style-type: none"><li>- 3 semaines de fermentation</li><li>- 3 retournements au minimum</li><li>- 3 jours entre chaque retournement</li><li>- 55 °C au moins pendant 72 h</li></ul>
par aération forcée	<ul style="list-style-type: none"><li>- 2 semaines de fermentation</li><li>- 1 retournement au minimum</li><li>- 3 jours entre chaque retournement</li><li>- 55 °C au moins pendant 72 h</li></ul>

arrêté du 22 avril 2008 fixant les règles techniques auxquelles doivent satisfaire les installations de compostage ou de stabilisation biologique aérobie soumises à autorisation

# C2- Le process de méthanisation



# C2- Le process de méthanisation



	Méthanisation par voie humide (<15% matières sèches)	Méthanisation par voie sèche (15-40% matières sèches)
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>- homogénéisation du substrat</li> <li>- optimisation du transfert de matière et de chaleur</li> <li>- amélioration production de biogaz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- flux de matière limité</li> <li>- taille réduite du méthaniseur</li> <li>- taux de matière sèche équivalent à celui de déchets entrants</li> </ul>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>- flux de matière élevé (car dilution)</li> <li>- coût de déshydratation du digestat</li> <li>- production forte de jus et lixiviats</li> <li>- important volume des réacteurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- conditions moins favorables des transferts matière et chaleur</li> </ul>



# C2- Le process de méthanisation



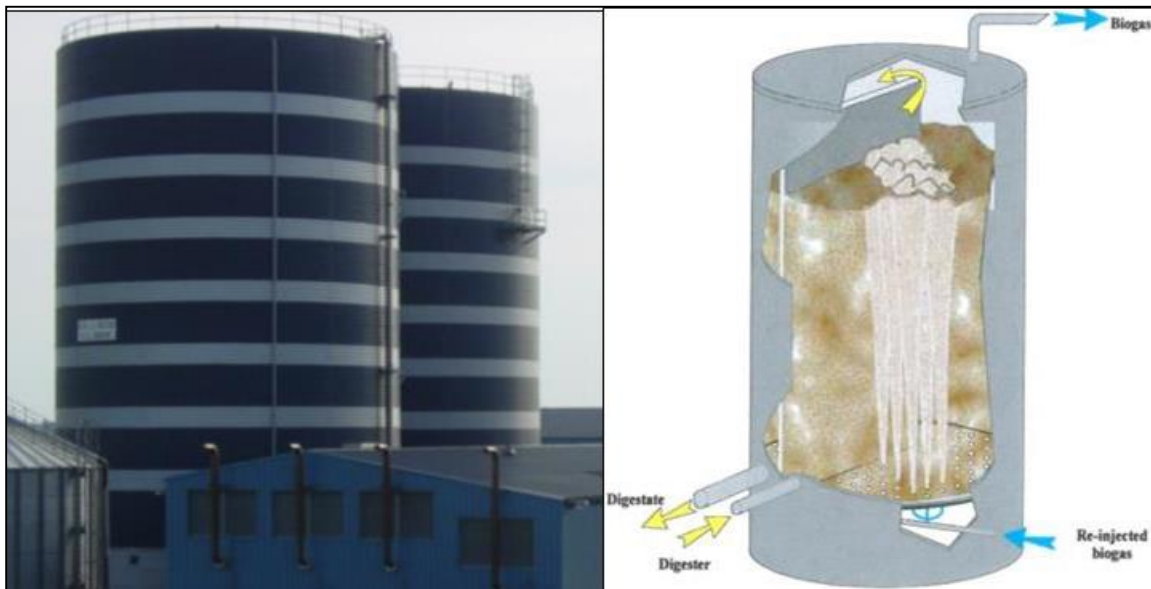
	Régime mésophile (± 35 °C)	Régime thermophile (± 55 °C)
<b>Avantages</b>	<p>Faible énergie mise en œuvre</p> <p>Faible production d'ammoniaque</p> <p>Fermentation lente de l'ordre de 4 à 6 semaines</p>	<p>Degré d'hygiénisation élevé</p> <p>Rendement élevé de dégradation</p> <p>Fermentation rapide de l'ordre de 2 à 3 semaines</p>
<b>Inconvénients</b>	<p>Hygiénisation limitée</p> <p>Dégradation moyenne</p>	<p>Consommation énergétique élevée</p> <p>Production forte d'ammoniaque</p>

## C2- Le process de méthanisation

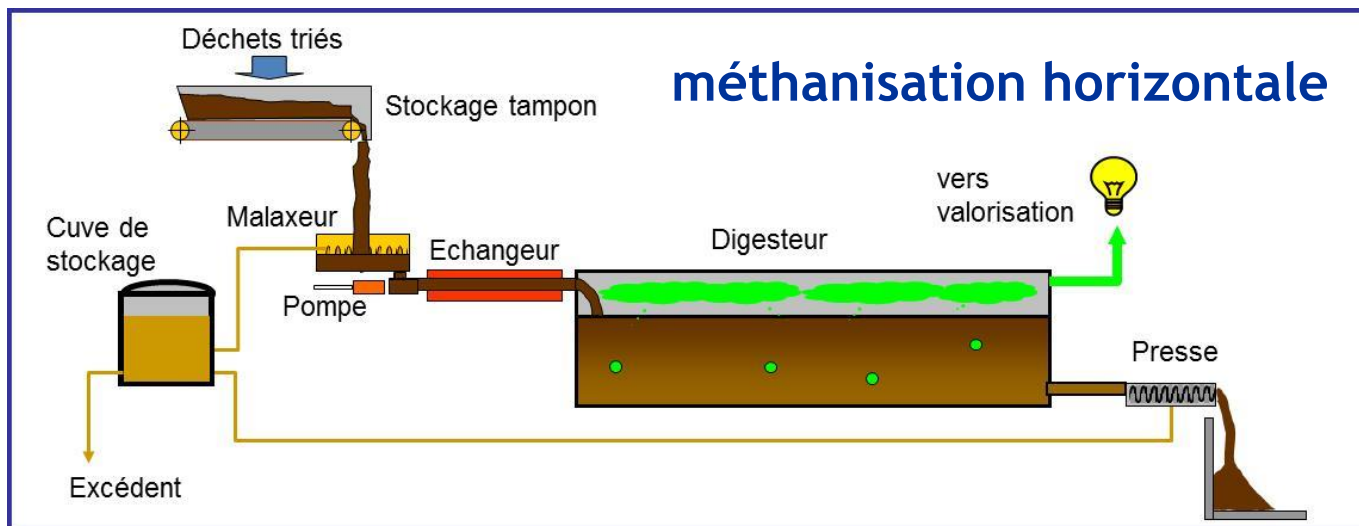


Nature des déchets	Volume de CH4 produit en m3	Equivalents énergétiques en kWh
OMR	65 - 75	200 - 260 électriques 300 - 450 thermiques
OMR + papiers & cartons	75 - 85	240 - 300 électriques 350 - 500 thermiques
Biodéchets + déchets verts	50 - 60	160 - 210 électriques 230 - 360 thermiques

# C2- Le process de méthanisation

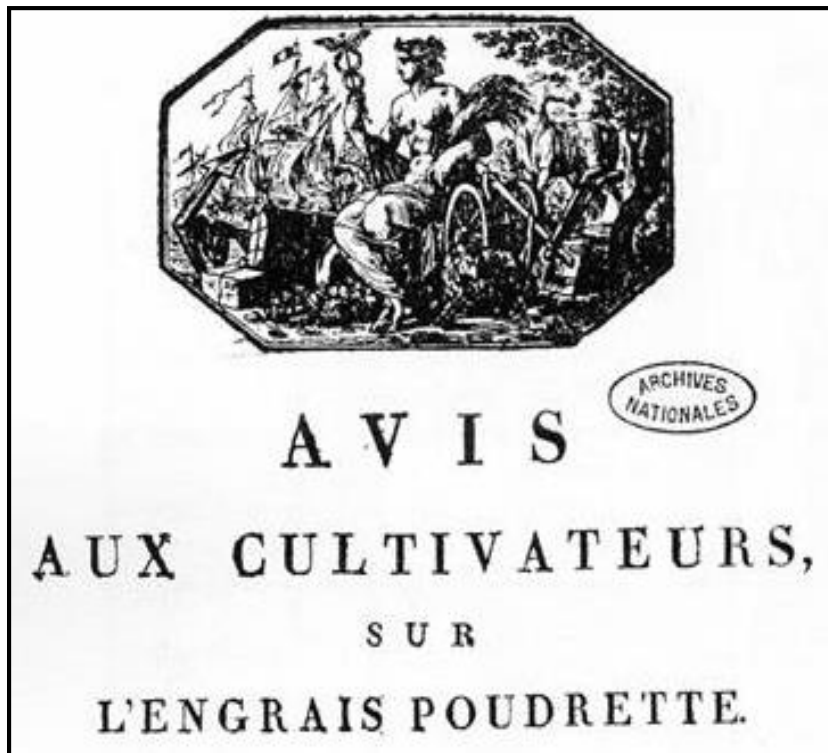


méthanisation  
verticale






# Recycler les immondices : une démarche ancienne



fertiliser les champs avec les vidanges  
séchées des citadins (Paris, 1790)



**MÉMOIRE**  
**sur LES ENGRAIS**  
**TIRÉS DES IMMONDICES**  
**ET DES**  
**LATRINES DE GRENOBLE;**  
 PAR M. BERRIAT-SAINT-PRIX;  
 Inséré dans l'Annuaire de l'Isère de 1808.



**Grenoble, 1808**

GRENOBLE,  
 Chez J. ALLIER, Imprimeur, 1808.



**L'engrais**  
**DIOR**  
 c'est de l'Or

*Tous produits Chimiques*  
 pour l'Agriculture et l'Industrie

4 USINES :  
 S<sup>t</sup>NICOLAS près Granville  
 S<sup>t</sup>MARC près Brest  
 LANDERNEAU  
 RENNES

**DIOR FILS & C<sup>ie</sup>**  
 7 RUE d'Athènes PARIS


**fertiliser les champs avec les vidanges séchées des citadins**





# Valoriser les gadoues en agriculture (Narbonne - 1932)



VILLE DE  NARBONNE

RÉGIE MUNICIPALE

Exploitation des Ordures Ménagères

USINE SAINTE-ROSE  
NARBONNE

◆

**TRAITEMENT**  
**des Ordures Ménagères**  
par fermentation en cellules closes  
Procédé "ZYMOS"

◆

NARBONNE  
Imprimerie-Papeterie M. DEMEULENÈRE - 36, Rue Adrien Nonier

1939

## Principe de la Récupération

Une fois résolu par une collectivité le problème de la collecte des ordures ménagères, se pose celui de leur destruction.

Le but à atteindre est double :

1<sup>o</sup> Laisser le moins possible au contact de l'air et aux risques d'ambiance les GADOUES VERTES, porteuses de germes nocifs et sources d'odeurs nauséabondes.

2<sup>o</sup> Retirer le plus grand profit possible de leur transformation.

Deux méthodes se partagent la faveur des municipalités appelées à résoudre ce problème :

1<sup>o</sup> La méthode de l'INCINÉRATION ;

2<sup>o</sup> La méthode de FERMENTATION ACCÉLÉRÉE.

C'est à la deuxième méthode que s'est arrêtée la Municipalité de NARBONNE, qui a pensé ainsi retirer le plus grand profit possible de la transformation des gadoues en un produit STERILE, utilisable sous forme d'un excellent engrais, à une époque où la raréfaction des fumures organiques pose à l'agriculture un problème délicat.



# Valoriser les gadoues en agriculture (Narbonne - 1932)



## Caractères principaux et utilisation du Terreau de Gadoues

Nous avons indiqué déjà que le terreau de gadoues, sans être l'unique produit de récupération provenant de l'usine, en est le produit essentiel.

Il se présente sous la forme d'une matière pulvérulente à peu près inodore, stérile-l'aseptie du terreau de gadoues est un des principaux avantages - de couleur noirâtre, légèrement humide, d'un poids spécifique pouvant varier de 650 à 800 kgs.

Ses constituants principaux, ainsi que nous l'avons précédemment noté sont:

L'AZOTE TOTAL	0,55 p. cent
L'ACIDE PHOSPHORIQUE	0,50 à 0,60 p. cent
La POTASSE	0,60 à 0,75 p. cent
La CHAUX	7 à 9 p. cent



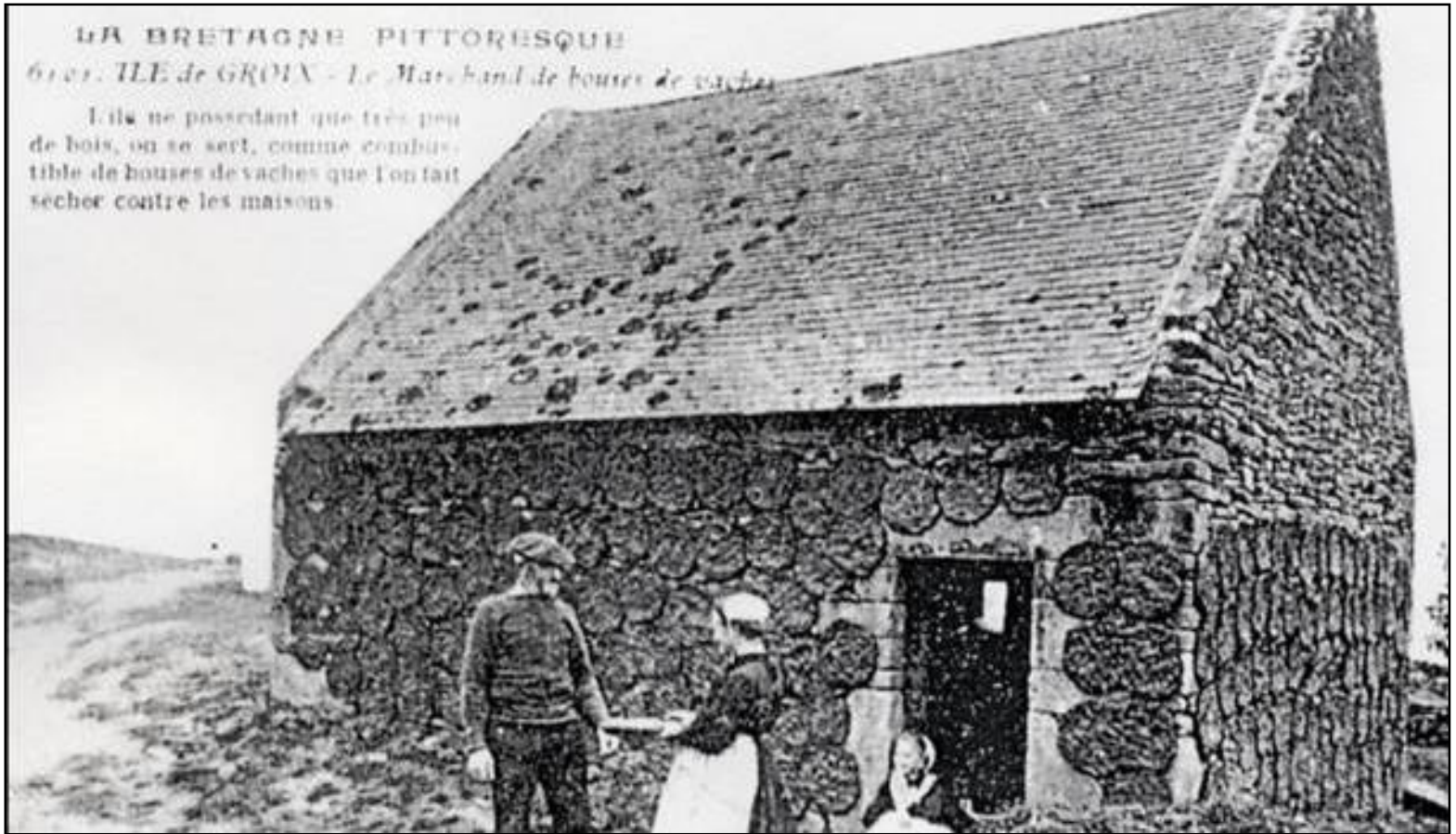


# Véhicule biogaz

(Institut d'agronomie d'Alger, 1940)







## LA BRETAGNE PITTORRESQUE

6101. ILE de GROIX - Le Marchand de bouses de vaches

Ils ne possédant que très peu de bois, on se sert, comme combustible de bouses de vaches que l'on fait sécher contre les maisons.

**Une solution alternative ?  
se chauffer avec la bouse  
(Bretagne, 1900)**



# Produire de la nourriture avec les ordures (Berne, Suisse - 1922)



Fig. 37. — Déversement à Witzwil des ordures ménagères de Berne.



# Recensement des installations de TMB



 TMB – Compostage

 TMB – Méthanisation/Compostage

 TMB – Stabilisation aérobie /  
Enfouissement

- 60 installations avec méthanisation à court terme (35% en nb) qui traiteront 56% des flux admis (3,2 MT/an)

- réciproquement, 65% des usines avec compostage seul



# Le vade-mecum des TMB en bref

---



- un travail engagé en 2007 à la demande du SYCTOM et publié en juillet 2012



- une quinzaine de contributeurs et relecteurs dont l'ADEME et le Ministère de l'Ecologie



- plus de 250 pages avec de nombreuses illustrations et retours d'expériences



- des connaissances théoriques accompagnées de données industrielles



# Vade-mecum des Traitements Mécano-Biologiques des déchets ménagers



# Les différents traitements biologiques

## D- Perspectives



- Une diversité des solutions techniques
- Un rejet quasi-généralisé de toute nouvelle installation et d'extension
- Une prime à l'énergie verte (métha)
- Des exigences contradictoires (usine bon marché et performante, bon compost et peu de refus etc...)
- Des restrictions budgétaires...



# Merci de votre attention



## Des questions ?

# « Du déchets vers l'énergie »

**nouvelle unité de traitement et de  
valorisation des bio-déchets par  
méthanisation par voie sèche**

Baudelet  
environnement



# Présentation du groupe Baudelet Environnement

Baudelet  
environnement







# Présentation du groupe BAUDELET Environnement

Présentation du  
groupe



Rappel  
réglementaire &  
Définition

L'offre  
Baudelet  
Environnement

Zoom sur les  
installations de  
traitement

Conclusion  
Q/R

Le groupe Baudelet Environnement est composé de 6 sociétés, réparties en 3 pôles d'activités :



- Baudelet Holding
- Baudelet SA – Traitement et Valorisation des déchets
- Baudelet Métaux – Traitement et Valorisation des Ferrailles et Métaux
- Baudelet Matériaux – Traitement des Terres et Sédiments pollués
- SMB – Maintenance
- Baudelet Transport



# Présentation du groupe BAUDELET Environnement

Présentation du  
groupe



Rappel  
réglementaire &  
Définition

L'offre  
Baudelet  
Environnement

Zoom sur les  
installations de  
traitement

Conclusion  
Q/R

L'entreprise familiale fondée par Jean Baudelet en 1964  
c'est aujourd'hui :

- Un effectif de 250 salariés
- Un Eco-Parc de 300 hectares situé à Blaringhem
- Un Chiffre d'Affaires en constante évolution : 38 M€ en 2003, 70M€ en 2007 et 110M€ en 2011
- Un développement régional avec 6 implantations
- Certifications ISO 9001 et ISO 14 001 depuis 2004

ISO 9001

BUREAU VERITAS  
Certification



ISO 14001

BUREAU VERITAS  
Certification





# Les métiers du groupe BAUDELET Environnement

## Pôle déchets

CA 2011: 28 M€

Valorisation des  
D.I.B.  
(papier, carton,  
plastiques...)  
40.000t/an



Valorisation de bois  
6.000 à 12.000t/an  
Recyclage via la filiale  
Autrement Bois  
(300T/an)



Valorisation  
Bio-déchets  
(Déchets  
organiques)  
25.000t/an



Enfouissement de déchets  
ultimes :  
ISDND autorisé pour  
600 000t/an  
et actuellement  
320 000t/an  
de déchets réceptionnés







# Les métiers du groupe BAUDELET Environnement

## Pôle ferrailles et métaux

CA 2011: 75 M€

Chantier « grosses  
ferrailles » :  
Cisailles 900 t,  
500 t,  
découpe  
chalumeau...



Chantier  
métaux et  
traitement des  
MIOMs



Affinerie  
d'aluminium  
600 à 1 000t/mois  
d'aluminium de 2<sup>nde</sup>  
fusion produit.



Dépollution des  
VHU  
300 à 500  
VHU/mois



Chantier broyeur:  
Broyeur agréé de  
3 000 CV  
7 000 à 10 000t/mois de  
ferrailles et métaux  
réceptionnées sur site





# Les métiers du groupe BAUDELET Environnement

## Pôle matériaux

CA 2011: 3,4 M€

20 000 t/an de terres polluées aux  
hydrocarbures  
réceptionnées et traitées  
par bioremédiation



Pilote sur le traitement  
des sédiments pollués  
aux métaux lourds.

🏆 Prix de l'Eco-Innovation  
Environord 2009





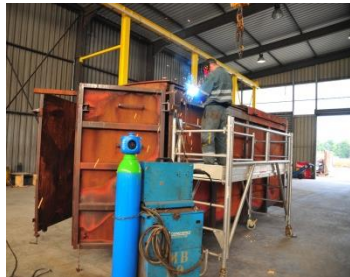
# Les métiers du groupe BAUDELET Environnement

## Activités supports

**Transport**  
50 camions  
3 000 bennes  
Suivis par  
Géolocalisation



**Maintenance**  
Entretien,  
grenailage



**Holding**  
Fonctionnement  
général





# Rappel de la réglementation & définition des Bio-déchets

Baudelet  
environnement





# Rappel de la réglementation sur les déchets organiques

Présentation du  
groupe

Rappel  
réglementaire &  
Définition

L'offre  
Baudelet  
Environnement

Zoom sur les  
installations de  
traitement

Conclusion  
Q/R

- L'article L.541-21-1 du Code de l'environnement (grenelle II) oblige les entreprises productrices de bio-déchets **à mettre en place un tri à la source et une valorisation biologique.**

Année d'application de la loi	Entreprises concernées produisant X tonnes de bio-déchets par an
2012	120 t
2013	80 t
2014	40 t
2015	20 t
2016	10 t

- Cette loi s'applique dès le 1<sup>er</sup> janvier 2012 aux entreprises produisant plus de 120 tonnes de bio-déchets par an, puis progressivement jusqu'en 2016 à toutes les entreprises produisant au moins 10 tonnes/an de bio-déchets



# Qu'est ce qu'un bio-déchet?

Présentation du  
groupe

Rappel  
réglementaire &  
Définition



L'offre  
Baudelet  
Environnement

Zoom sur les  
installations de  
traitement

Conclusion  
Q/R

## Un bio-déchet ?

Tout déchet non  
dangereux  
biodégradable:  
de jardin ou de parc



Tout déchet non  
dangereux alimentaire  
ou de cuisine : des  
ménages, des  
restaurants, des  
traiteurs ou des  
magasins de vente au  
détail



Tout déchet comparable  
provenant des  
établissements de  
production ou de  
transformation de  
denrées alimentaires







# Exemples concrets de bio-déchets...

Plus concrètement... sont considérés comme bio-déchets:



**MAIS**

## Déchets interdits

(Par leur caractère de danger )  
Piles, Ampoules, Produits à base de solvants, Pots de peinture

## Déchets indésirables

(Par les risques de blocage des équipements ) :  
Os de grosses tailles, peaux d'animaux

**Et tout autre déchet non organique...**

Présentation du groupe

Rappel réglementaire & Définition

L'offre Baudelet Environnement

Zoom sur les installations de traitement

Conclusion Q/R



# Agrément sanitaire pour les installations de méthanisation et de compostage

Présentation du  
groupe

Rappel  
réglementaire &  
Définition

L'offre  
Baudelet  
Environnement

Zoom sur les  
installations de  
traitement

Conclusion  
Q/R

Afin de vous garantir des prestations de qualité, nous mettons un point d'honneur sur **la sécurité sanitaire**. En mars 2012, le groupe Baudelet Environnement a déposé une demande **d'agrément sanitaire** en application des textes réglementaires suivants :

- **Règlement (CE) n°1069/2009 du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009** établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation humaine
- **Règlement (UE) n° 142/2011 de la Commission du 25 février 2011** portant application du règlement (CE) n°1069/2009
- **Arrêté du 8 décembre 2011** établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés.

**La demande est en cours d'instruction par la Direction Départementale de la Protection des Populations du Nord (DDPP)** et est délivré après visite de la DDPP avant la mise en service des installations.



# Agrément sanitaire pour les installations de méthanisation et de compostage

Présentation du  
groupe

Rappel  
réglementaire &  
Définition

L'offre  
Baudelet  
Environnement

Zoom sur les  
installations de  
traitement

Conclusion  
Q/R

## Les sous-produits animaux acceptables:

- **Sous-produits animaux de catégorie 3**  
→ Carcasses et parties d'animaux abattus ou de gibier, propres à la consommation humaine
- **Sous-produits animaux de catégorie 2 acceptables sans traitement**  
→ Lisier, lait et produits à base de lait, œufs et produits à base d'œufs
- **Sous-produits animaux de catégorie 2 ayant subi un traitement préalable** de stérilisation sous pression et de marquage des matières finales sur un site extérieur





# Zoom sur... la méthanisation par voie sèche

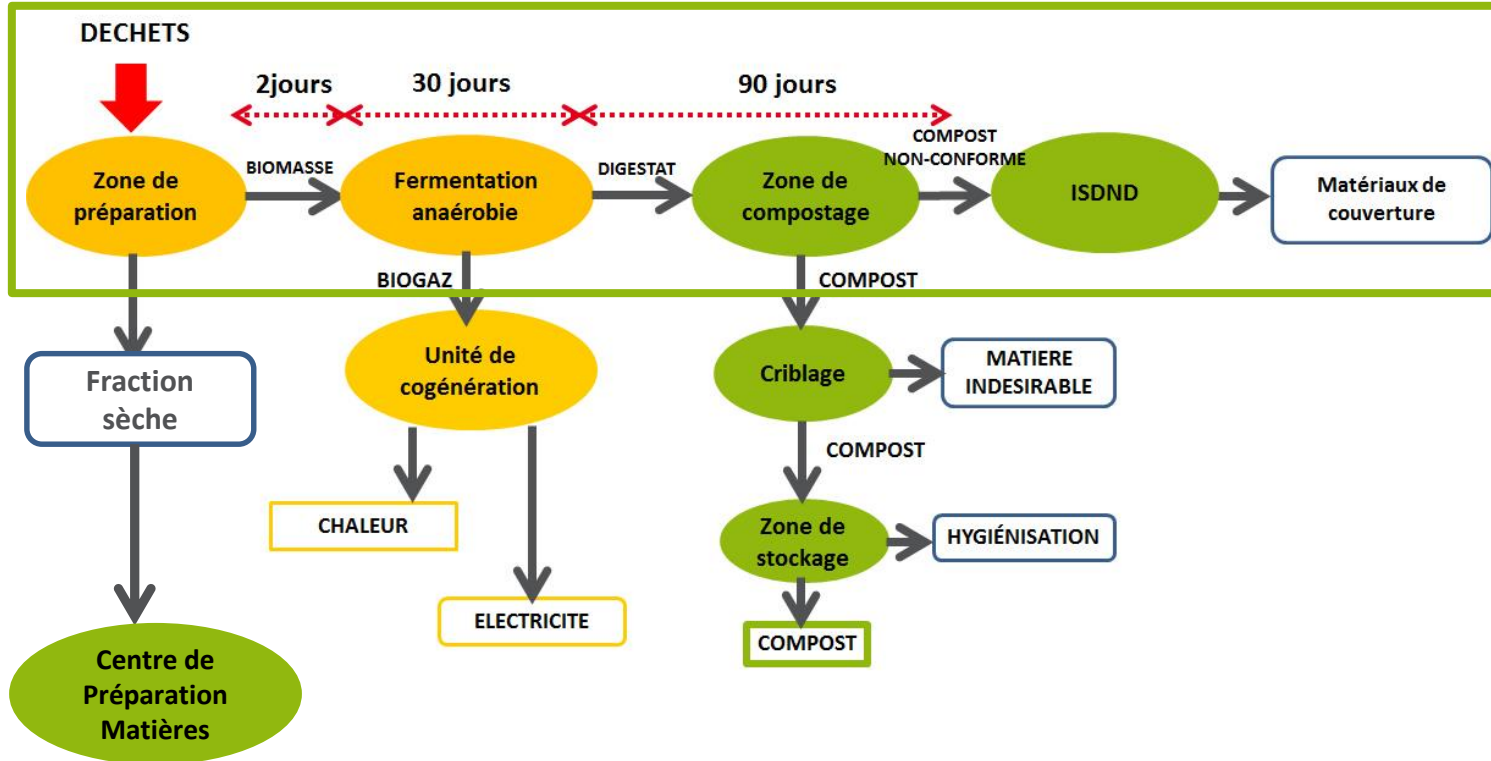
Présentation du  
groupe

Rappel  
réglementaire &  
Définition

L'offre  
Baudelet  
Environnement

Zoom sur les  
installations de  
traitement

Conclusion  
Q/R





# Schéma global de l'installation de méthanisation par voie sèche

Présentation du  
groupe

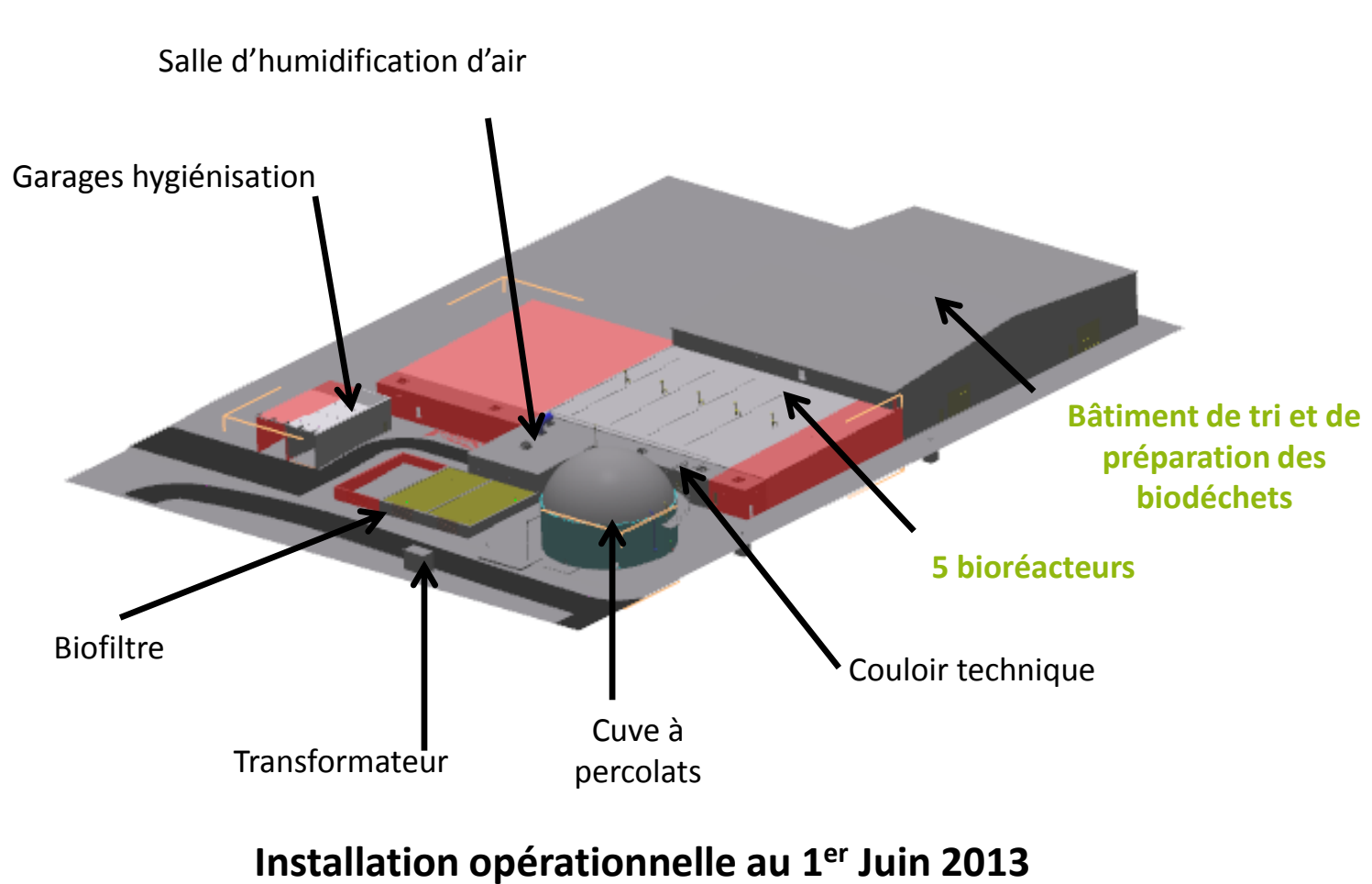
Rappel  
réglementaire &  
Définition

L'offre  
Baudelet  
Environnement

Zoom sur les  
installations de  
traitement



Conclusion  
Q/R





## Zoom sur... la phase préparatoire

Présentation du  
groupe

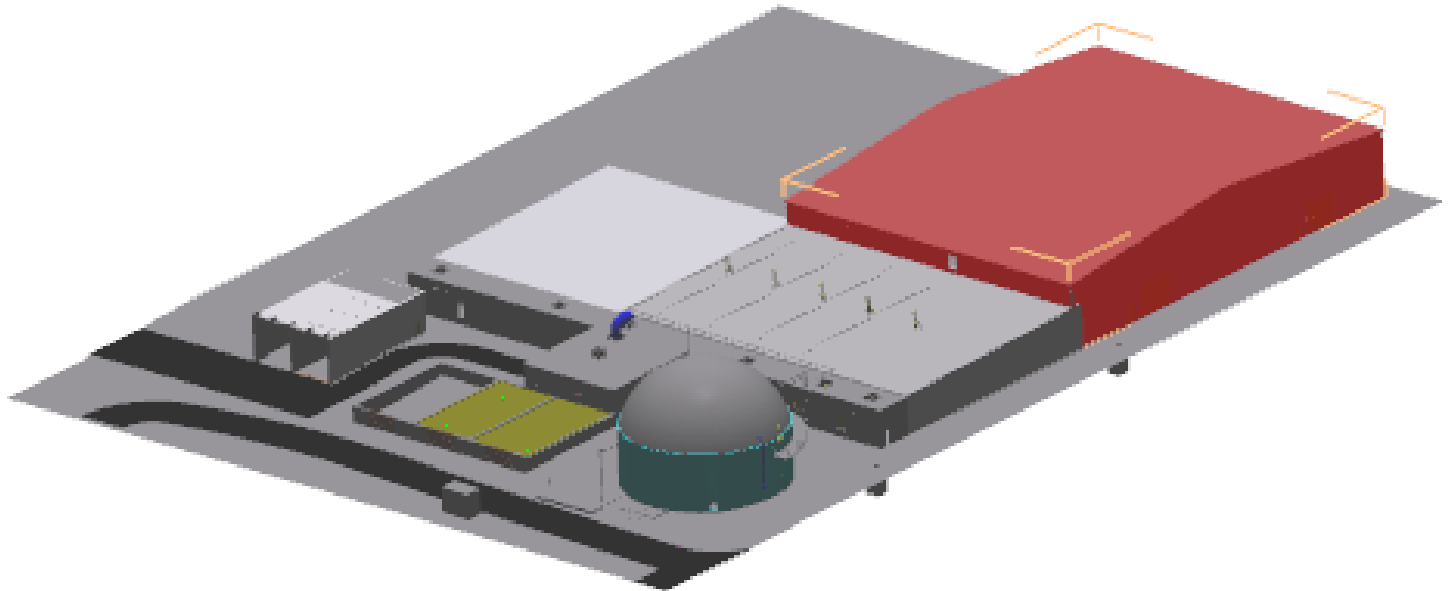
Rappel  
réglementaire &  
Définition

L'offre  
Baudelet  
Environnement

Zoom sur les  
installations de  
traitement

Conclusion  
Q/R

- Surface totale 3360 m<sup>2</sup>
- 3 box de stockage des déchets, capacité 630 t (densité 0,7)
- 1 zone de mélange et de stockage de la partie fermentescible : 1200t (densité1)
- 1 cuve de stockage de 30m<sup>3</sup> de biodéchet liquide (graisses, huiles, glycérine....)
- 1 zone de stockage de déchets secs (verts, cartons, etc.), capacité 840t (densité 0,7)



**Séparation par extrusion de la fraction fermentescible (biomasse) et de la fraction non fermentescible (matière sèche)**





# Zoom sur... la phase préparatoire

Présentation du  
groupe

Rappel  
réglementaire &  
Définition

L'offre  
Baudelet  
Environnement

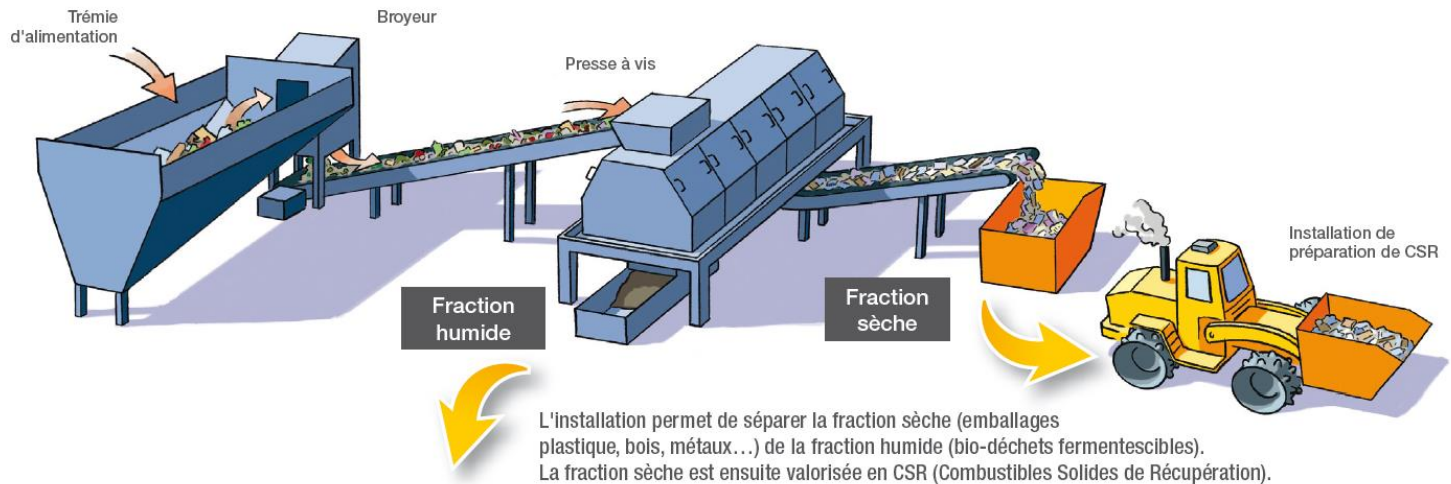
Zoom sur les  
installations de  
traitement



Conclusion  
Q/R

## Préparation des bio-déchets

pour séparer les bio-déchets de leurs emballages





# Zoom sur... les bioréacteurs (Fermentation anaérobie de la biomasse)

Présentation du  
groupe

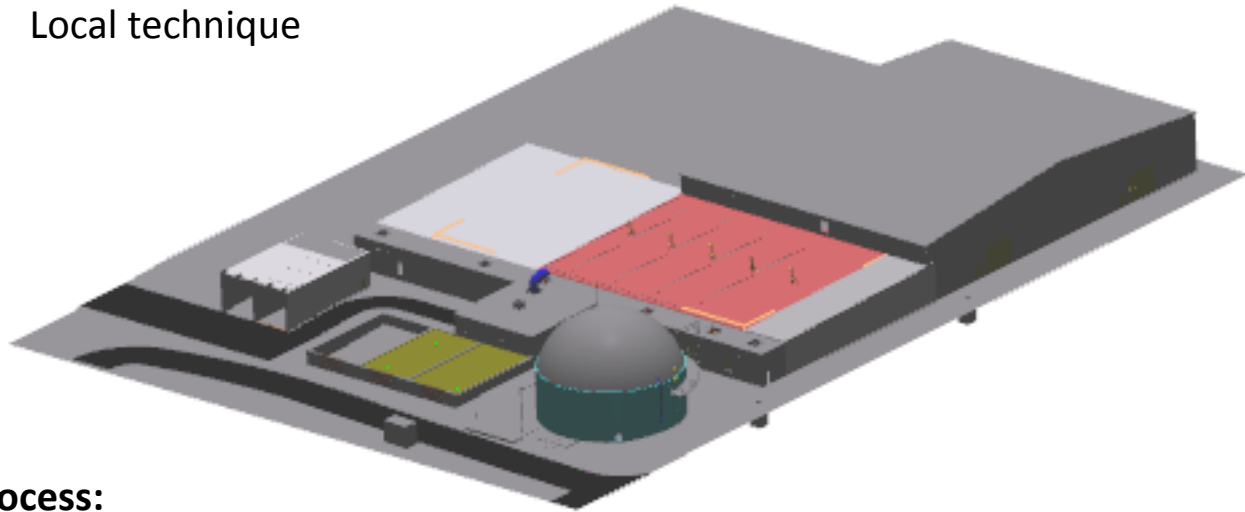
Rappel  
réglementaire &  
Définition

L'offre  
Baudelet  
Environnement

Zoom sur les  
installations de  
traitement

Conclusion  
Q/R

- Surface totale : **4800m<sup>2</sup>**
- 1 aire de chargement et de manœuvre (1920m<sup>2</sup>)
- 4 bioréacteurs anaérobie + 1 bioréacteur hybride (anaérobie ou aérobie)
- Capacité d'un bioréacteur : 300 m<sup>3</sup>
- Local technique



Process:

- Introduction par chargeuse de fraction fermentescible dans les bioréacteurs pour 30 jours
- Humidification de la biomasse avec des lixiviats et montée en température des bioréacteurs pour accélérer la méthanisation des déchets



# Zoom sur... les bioréacteurs (Fermentation anaérobie de la biomasse)

Présentation du  
groupe

Rappel  
réglementaire &  
Définition

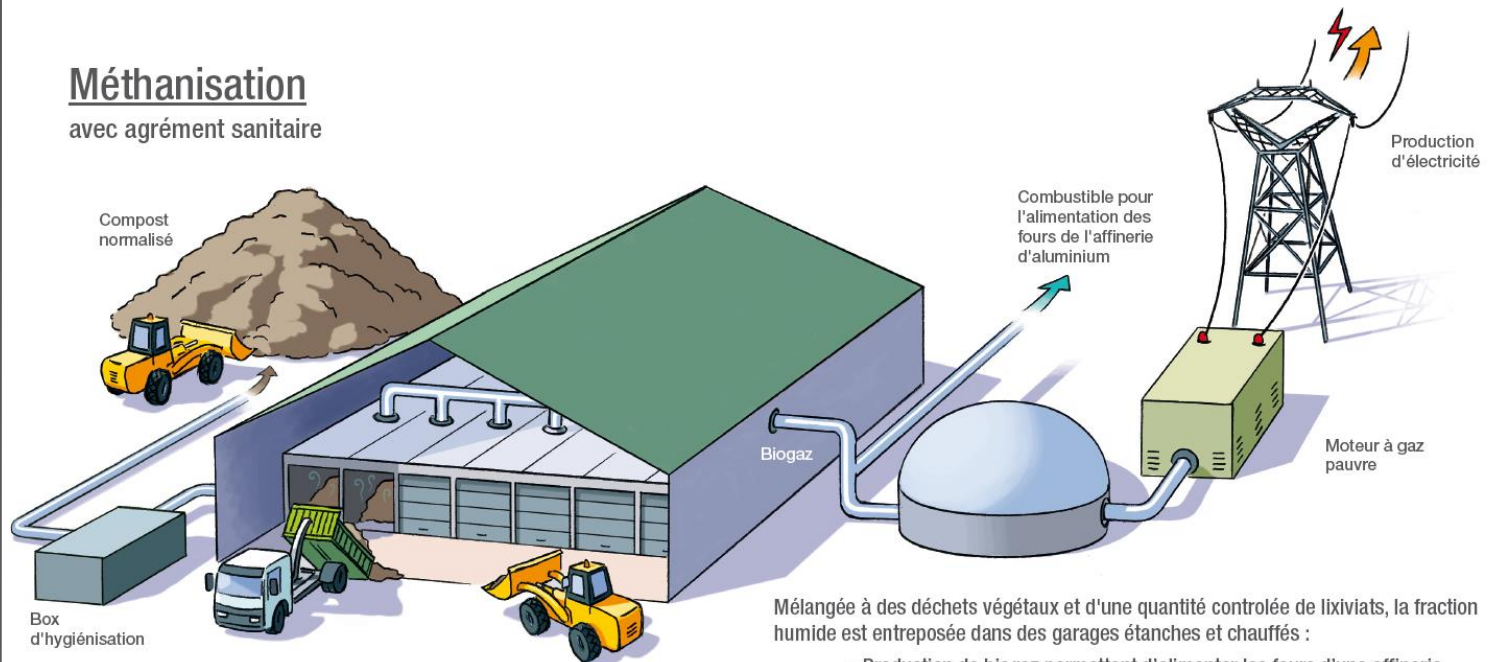
L'offre  
Baudelet  
Environnement

Zoom sur les  
installations de  
traitement

Conclusion  
Q/R

## Méthanisation

avec agrément sanitaire



Mélangée à des déchets végétaux et d'une quantité contrôlée de lixiviats, la fraction humide est entreposée dans des garages étanches et chauffés :

- Production de biogaz permettant d'alimenter les fours d'une raffinerie d'aluminium ainsi que des moteurs à gaz pauvre produisant de l'électricité.
- Production d'un compost de qualité.





## Zoom sur... La zone de compostage

Présentation du  
groupe

Rappel  
réglementaire &  
Définition

L'offre  
Baudelet  
Environnement

Zoom sur les  
installations de  
traitement

Conclusion  
Q/R

Après 30 jours, **le digestat obtenu est envoyé sur une plateforme de compostage**

Un retournement et un suivi de l'andain est effectué régulièrement.

Tous les 3 mois, l'andain est **criblé et séparé** en deux flux:

- **La fraction 0/20 mm** est envoyé dans un **box d'hygiénisation** pour la fabrication d'un **compost normé**, qui servira de matériaux d'épandage.
- **La fraction > 20 mm** est réinjectée sur la plateforme pour un nouveau cycle de compostage.



→ **Le compost non conforme** est utilisé comme **matériau de couverture** de notre ISDND



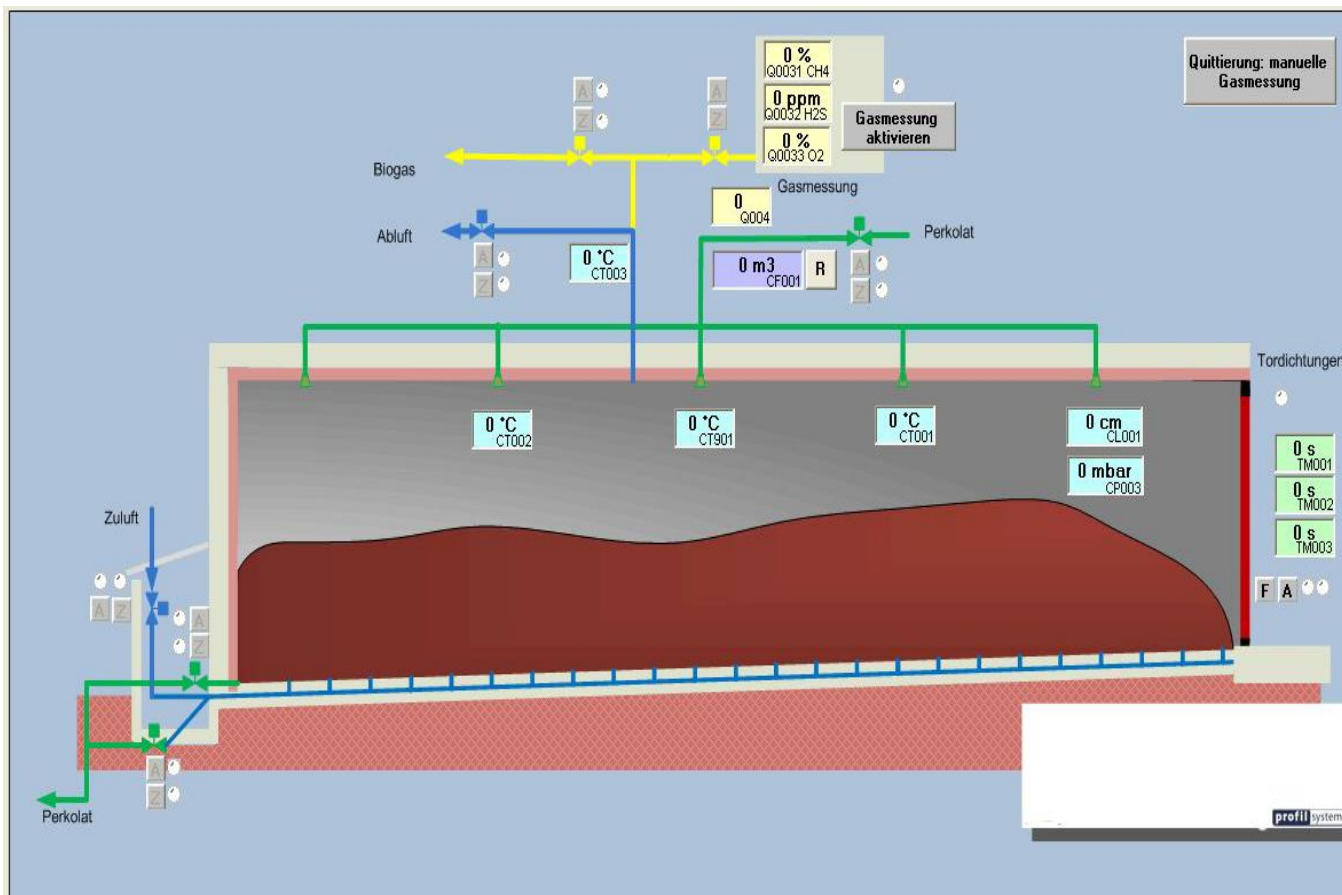
Présentation du  
groupe

Rappel  
réglementaire &  
Définition

L'offre  
Baudelet  
Environnement

Zoom sur les  
installations de  
traitement

Conclusion  
Q/R





Présentation du  
groupe

Rappel  
réglementaire &  
Définition

L'offre  
Baudelet  
Environnement

Zoom sur les  
installations de  
traitement

Conclusion  
Q/R

➤ **Capacité : 20 000 T/an**

➤ **5 bioréacteurs**

- Volume utile : 492 m<sup>3</sup>
- Temps de remplissage: 1 semaine
- Temps de digestion: 3 à 4 semaines

➤ **Production du biogaz**

- 75 à 110 m<sup>3</sup>/T
- 53% de CH<sub>4</sub>
- 512 kW électrique

➤ **Production de compost**

- 15 000 T/an de digestat
- 25% perte matières



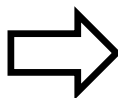


**Biogaz** issu de la dégradation lente des déchets

-  
**Principalement composé de Méthane**



Fours de l'affinerie d'aluminium



Moteurs à gaz pauvres

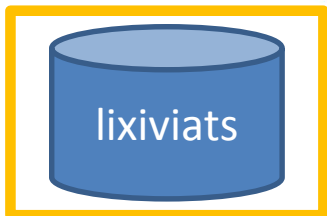


Evapo-concentrator pour le traitement de l'eau

**La valorisation des déchets ultimes en éco-produits**



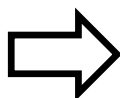
**Electricité « verte »**



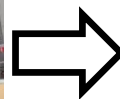
**La valorisation des  
déchets ultimes en  
éco-produits**



**Lixiviats ou « jus de déchets »  
issu de la fermentation des  
déchets**



**Evapo-concentrateur**



**Lave-glace écologique  
rechargeable  
100% biodégradable**

# Conclusion

Baudelet  
environnement







**Présentation du  
groupe**



Coût d'investissement, d'exploitation et de maintenance faible

**Rappel  
réglementaire &  
Définition**



Faible consommation énergétique



Construction modulaire des garages

**L'offre  
Baudelet  
Environnement**



Technologie robuste – Tolérance aux refus élevée

**Zoom sur les  
installations de  
traitement**



Système moderne contrôlé et assisté à distance



Hauts rendements et haute qualité du biogaz (peu de H<sub>2</sub>S)

**Conclusion  
Q/R**



Possibilité d'utiliser des équipements existants – chargeuse principalement



**Présentation du  
groupe**

**Rappel  
réglementaire &  
Définition**

**L'offre  
Baudelet  
Environnement**

**Zoom sur les  
installations de  
traitement**

**Conclusion  
Q/R**

- Fermentations anaérobie et aérobie réalisées dans le même bioréacteur
- Maintien en température par chauffage au sol des bioréacteurs
- Inoculation des biodéchets par les lixiviats ou percolats contenus dans la cuve de stockage
- Recirculation des lixiviats ou percolats
- Pas de réutilisation d'une partie du digestat pour un second cycle
- Traitement de l'air - biofiltration
- Traitement du biogaz - séchage, désulfuration, charbon actif

**Merci de votre attention.**

**Avez-vous des questions  
complémentaires?**

**Baudelet**  
environnement





Section interrégionale de  
Haute et Basse-Normandie

**Journée scientifique et technique**

**OPTIMISATION DU TRAITEMENT BIOLOGIQUE  
DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DES DÉCHETS NON DANGEREUX**

**ZOOM SUR LA TECHNIQUE DU BIORÉACTEUR**

**Présentation générale du mode de traitement**

***Jean-Michel Mandiuk***



## Un bioréacteur c'est quoi ? ...



*Enceinte confinée dans laquelle se développent spontanément des micro-organismes ...*



*Dans une Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux :  
Processus complexe aboutissant à la dégradation et à la stabilisation des déchets*



*En phase anaérobie, la matière biodégradable des déchets est consommée par des micro-organismes méthanogènes*

*La technique d'exploitation en mode bioréacteur consiste à contrôler et accélérer le processus, favorisé par le maintien de conditions physico-chimiques optimales:*

- Optimiser le confinement
- Maintenir les meilleures conditions d'humidité



**Un mode de traitement étudié et développé depuis de nombreuses années ...**

**Initiée aux USA dans les années 70 par l'EPA : recherches en laboratoire sur le bioréacteur anaérobie**

**Années 80 : Etudes à grande échelle sur cellules tests**

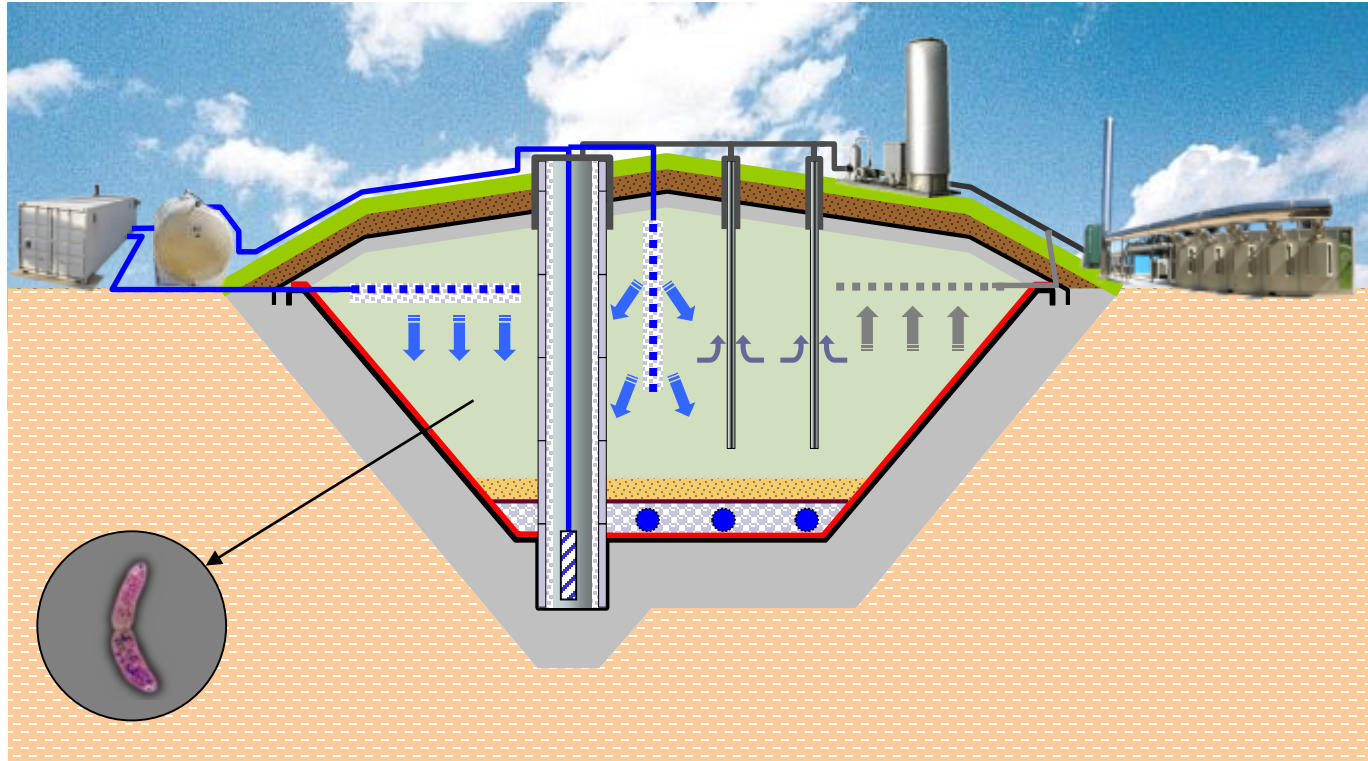
**Depuis les années 2000, multiplication des cellules d'exploitation en mode bioréacteur à travers le monde**

**Modélisations, prédictions quantitatives**

**Retours d'expériences, améliorations des techniques**



# Un bioréacteur c'est quoi ? ...



## Des bénéfices environnementaux ...

*Reproduire les conditions d'une cellule confinée :*

*Limitation des interactions déchets/environnement (réduction des risques de nuisances potentielles)*

*Captage optimal (>90%) du biogaz et réduction des émissions de GES*

*Stabilisation accélérée s'opérant pendant la phase d'exploitation commerciale et en période de pleine efficacité des dispositifs de confinement :*

- *limitation des risques à long terme*
- *optimisation de l'espace disponible*





## Maîtrise des dimensions techniques de l'exploitation ...

### Hydraulique des fluides liquides et gazeux :

- maîtrise de la distribution de l'humidité, optimisation du captage du gaz associées à des dispositifs de gestion appropriés et performants

### Biologie :

- la connaissance de l'état biologique du massif de déchets permettra d'adapter la réinjection

### Géomécanique :

- surveillance de la stabilité du bioréacteur et adaptation des aménagements



## .. des moyens humains et matériels ...

### Investissements matériels :

- Dispositifs de recirculation
- Couvertures haute performance
- Captage du biogaz densifié et mis en œuvre à l'avancement
- Systèmes de régulation et de contrôles

### Personnel d'exploitation dédié :

- Aménagements
- Suivi et pilotage





## Une énergie naturelle et spontanée ...

*Production optimisée de biogaz valorisable sous forme thermique ou électrique en remplacement d'énergies fossiles*

*Pas d'émissions de carbone fossile*

## Un véritable mode de traitement ...

**Elimination**

**Traitement**

**Valorisation énergétique**

**ISDND**



**Bioréacteur**



**Bioréacteur + valo biogaz**

**Dégradation subie**

**Stabilisation contrôlée**

**Stabilisation + exploitation du potentiel énergétique**



## Journée scientifique et technique

# OPTIMISATION DU TRAITEMENT BIOLOGIQUE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DES DÉCHETS NON DANGEREUX

## ZOOM SUR LA TECHNIQUE DU BIORÉACTEUR

Retour de l'étude de R&D « Suivi et optimisation du fonctionnement d'une  
ISDND exploitée en mode bioréacteur : évaluation de la recirculation de  
lixiviat, Suivi de la biodégradation »

**Sylvain MOREAU, Rémi CLEMENT, Julien Grossin-Debattista**

Irstea, institut national de recherche en sciences et technologies pour  
l'environnement et l'agriculture

Unité de recherche Hydrosystèmes et bioprocédés, Antony (92)  
Equipe de recherche technologique « Mesures Physiques pour les  
Milieux Poreux »





# Programme de recherche

*« Suivi et optimisation du fonctionnement d'une ISDND exploitée en mode bioréacteur : recirculation de lixiviat, capteurs de tassement, biodégradation et production de biogaz ».*



**Simon Loisel, SAS Les Champs Jouault, Cuves (50)**



**Sylvain Moreau, Rémi Clément, Julien Grossin-Debattista, Laurent Mazéas, Théodore Bouchez**  
Irstea, unité de recherche Hydrosystèmes et bioprocédés, Antony (92)



**Arnaud Poulain, ACOME, Mortain (50)**



**Jean-Luc Böhm, Université de Caen basse Normandie, Caen (14)**

**Avec le soutien de :**



Projet cofinancé par l'Union Européenne.  
L'Europe s'engage avec le Fonds européen de développement régional.

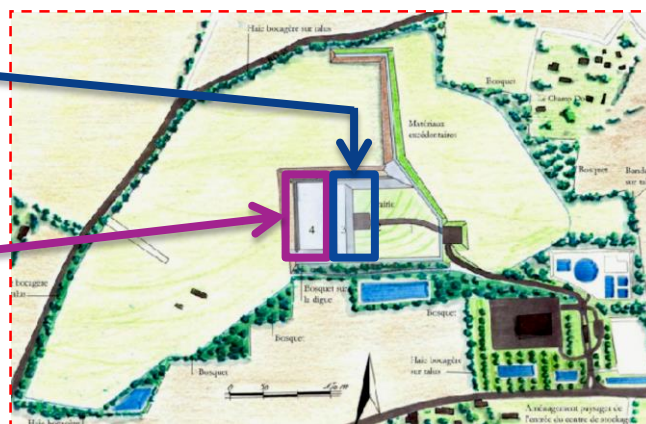
# Site expérimental : Les champs Jouault



- (1) Administration et pesée
- (2) **Bâtiment de tri**
- (3) Zone humide
- (4) **Quai de déchargement**
- (5) **Station de traitement des lixiviats**
- (6) Fauconnerie
- (7) Maintenance des espaces naturels
- (8) Serre de cultivation de spiruline

## Site expérimental : Les champs Jouault

- Casier 3 :**
  - exploité de janvier à septembre 2011
  - dimensions max 100 x 50 x 15 mètres
  - 61 000 tonnes de déchets



- Casier 4 :**
  - exploité de septembre 2011 à juillet 2012
  - dimensions max 100 x 50 x 15 mètres
  - 64 000 tonnes de déchets

# Objectifs industriels définis avec Les Champs Jouault

- **Question 1** : caractériser la composition des déchets et leur potentiel méthanogène
- **Question 2** : évaluer les performances des réseaux de réinjection
- **Question 3** : définir les cycles de réinjection pour optimiser la production de biogaz
- **Question 4** : suivre l'évolution de de la biodégradation à long terme



Journée scientifique et technique bioréacteur  
Cuves – 20 juin 2014







# Caractérisation de la composition des déchets et de leur potentiel méthanogène

**Objectifs** : connaître la composition des déchets stockés sur le site et déterminer le potentiel méthanogène des différents gisements disponibles

**Applications** :

- prélèvement de déchets sur site
- caractérisation de la composition des déchets au laboratoire
- évaluation du potentiel méthanogène au laboratoire



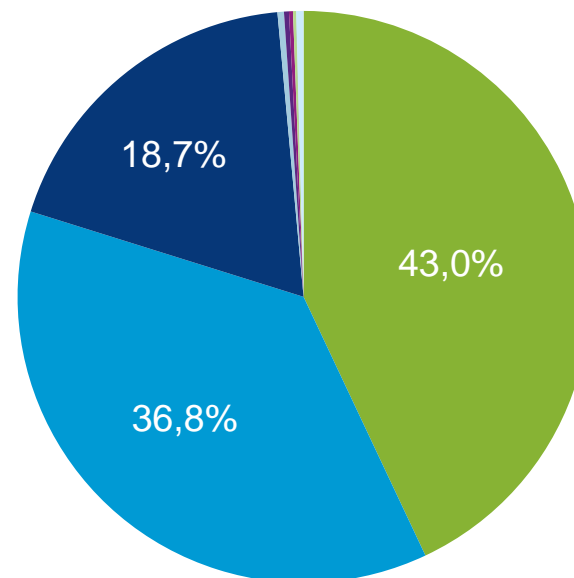
Journée scientifique et technique bioréacteur  
Cuves – 20 juin 2014



# Caractérisation de la composition des déchets et de leur potentiel méthanogène

Provenance des différents déchets stockés dans le casier 4  
(données Les champs Jouault)

- Déchets Industriels Ultimes
- Ordures Ménagères Résiduelles
- Encombrants de déchetterie
- DIB
- Sciure de bois
- Boues de STEP
- Bois
- Platre et Placoplatre
- Polystyrène
- Refus de Bâtiment de tri



# Caractérisation de la composition des déchets et de leur potentiel méthanogène

2 DIU et 1 OM ont été caractérisés en sortie de camion, fin avril 2012 et fin avril 2013 en collaboration avec Irstea Rennes

**XP X30-408 (2013)** : caractérisation d'un échantillon de déchets ménagers et assimilés.

Masse échantillonnée :

- 3,5 tonnes de DIU
- 1,1 tonnes d'OM

Masse sélectionnée pour caractérisation :

- 27 % des DIU
- 21 % de l'OM



# Caractérisation de la composition des déchets et de leur potentiel méthanogène

2 DIU et 1 OM ont été caractérisés en sortie de camion, fin avril 2012 et fin avril 2013 en collaboration avec Irstea Rennes

**XP X30-466 (2013)** : méthode de caractérisation / déchets ménagers et assimilés, analyse sur produits secs.

Classification par granulométrie :

- > 100 mm
- de 20 à 100 mm
- de 8 à 20 mm
- de 2 à 8 mm
- < à 2 mm





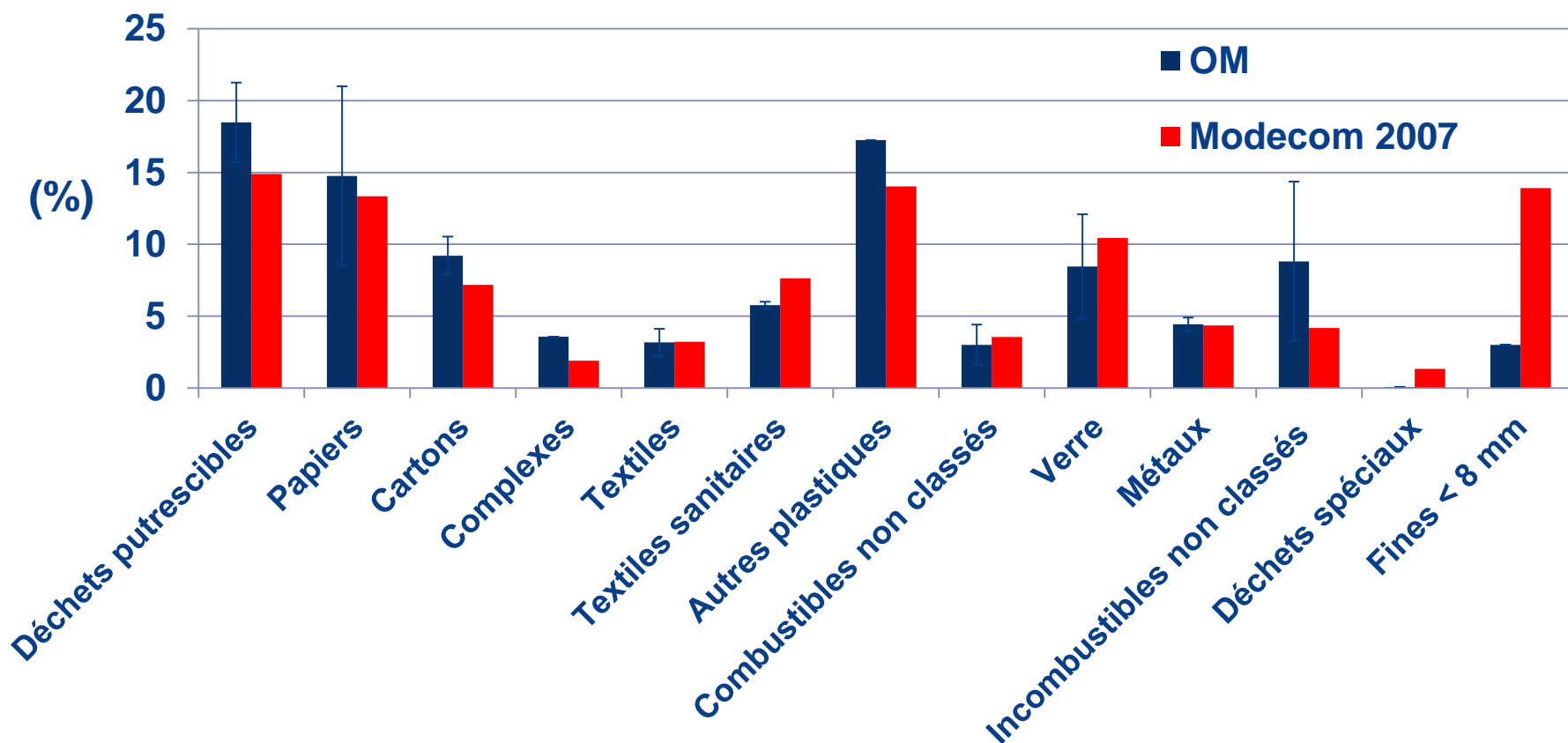
# Caractérisation de la composition des déchets et de leur potentiel méthanogène

La méthode de caractérisation Modecom<sup>tm</sup> utilise une classification selon des classes bien définies

Catégories	
Déchets putrescibles	Autres plastiques
Papiers	Combustibles non classés
Cartons	Verre
Complexes	Métaux ferreux
Textiles	Autres métaux
Textiles sanitaires	Incombustibles non classés
Films	Déchets spéciaux

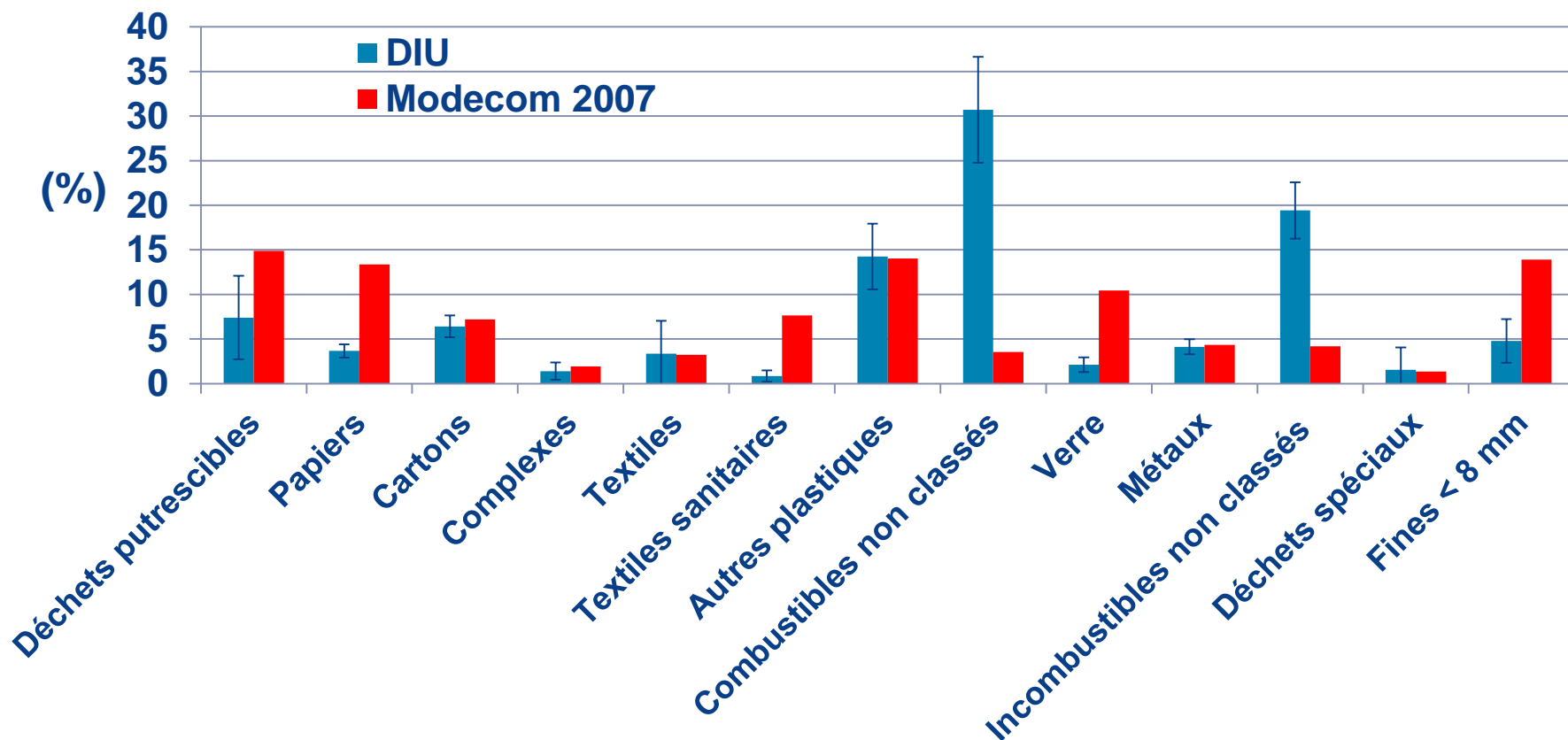
# Caractérisation de la composition des déchets et de leur potentiel méthanogène

Comparaison entre OM site Les Champs Jouault et campagne Modecom 2007



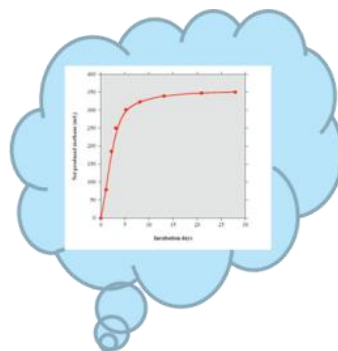
# Caractérisation de la composition des déchets et de leur potentiel méthanogène

Comparaison entre DIU site Les Champs Jouault et campagne Modecom 2007



# Caractérisation de la composition des déchets et de leur potentiel méthanogène

## Potentiel méthanogène OM et DIU



60 à 170 L/kg de méthane par tonne de déchets ménager secs (El-Fadel, Findikakis et al. 1996)



	Moyenne (L/kg de MS)	Ecart type (L/kg de MS)
OM	55.35	2.21
DIU1	0.85	2.10
DIU2	22.41	2.18





# Caractérisation de la composition des déchets et de leur potentiel méthanogène

## Conclusions

### Résultats pour l'exploitant :

- informations sur la composition des déchets entrants
- indicateur concernant le potentiel de valorisation des déchets pour la production de biogaz

### Résultats scientifiques :

- caractérisation de plusieurs DIU et évaluation de leur potentiel méthanogène



## Evaluation des performances des réseaux de réinjection du site

### Objectifs:

La teneur en eau est un paramètre majeur (déficitaire) pour la biodégradation, il est nécessaire **d'humidifier de manière homogène l'ensemble du massif de déchet.**

### Besoins:

- mesure sensible à la variation de la teneur en eau
- mesure spatialisante 2D/3D
- non-intrusive

### Applications :

- suivi d'injection **casier 3** et casier 4

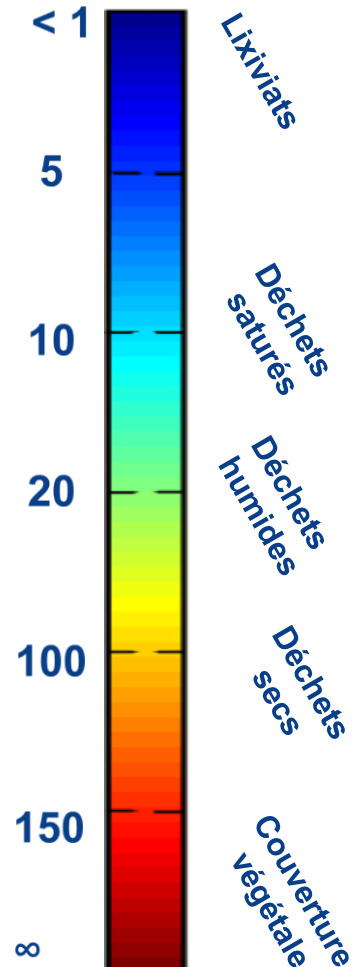
**Méthode retenue :**  
**la tomographie de résistivité électrique**

# La tomographie de résistivité électrique

## Principe de la mesure :

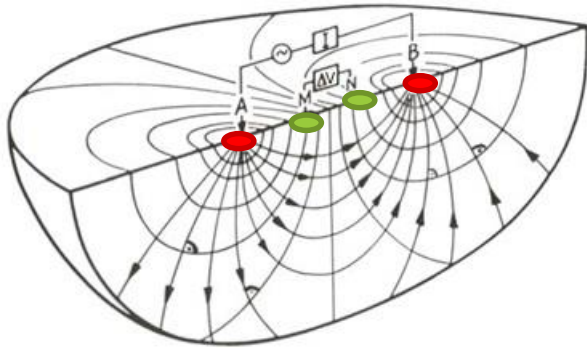
- Loi d'ohm (mesure de la résistance / résistivité électrique)
- Repose sur la mesure de la résistivité électrique, qui correspond à la capacité d'un matériau à s'opposer au passage d'un courant électrique
- Cette grandeur physique est sensible à :
  - la porosité du déchet,
  - la température,
  - **la teneur en eau**
  - **la conductivité du lixiviat**

Résistivité électrique (Ohm.m à 20° c)



# La tomographie de résistivité électrique

## La mesure



Utilisation d'un quadripôle (4 électrodes)

- 2 électrodes d'injection du courant ( $I$  en Ampère)
- 2 électrodes de mesure de potentiel ( $\Delta V$  en volt)

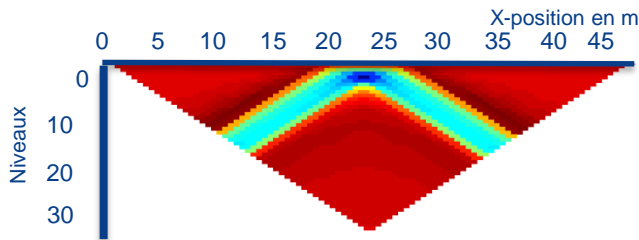
$$\rho = \frac{K \cdot \Delta V}{I} \text{ (}\Omega \cdot \text{m)}$$

## La tomographie : acquisition de plusieurs quadripôles

Chaque mesure intègre un volume fonction de l'espacement inter-électrodes



# Reconstruction 3D de la distribution de la résistivité électrique

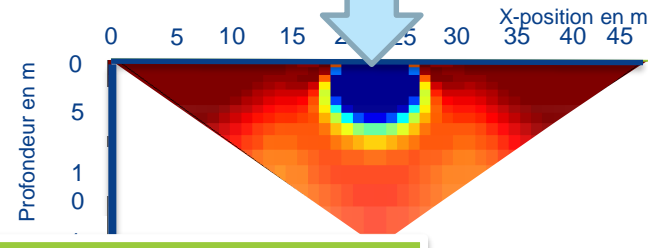


Mesures de résistivités électriques intégratrices

Difficultés:  
paramètres  
optimisation

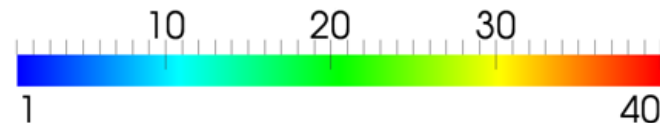
Algorithme de reconstruction 2D/3D

Détection de l'injection

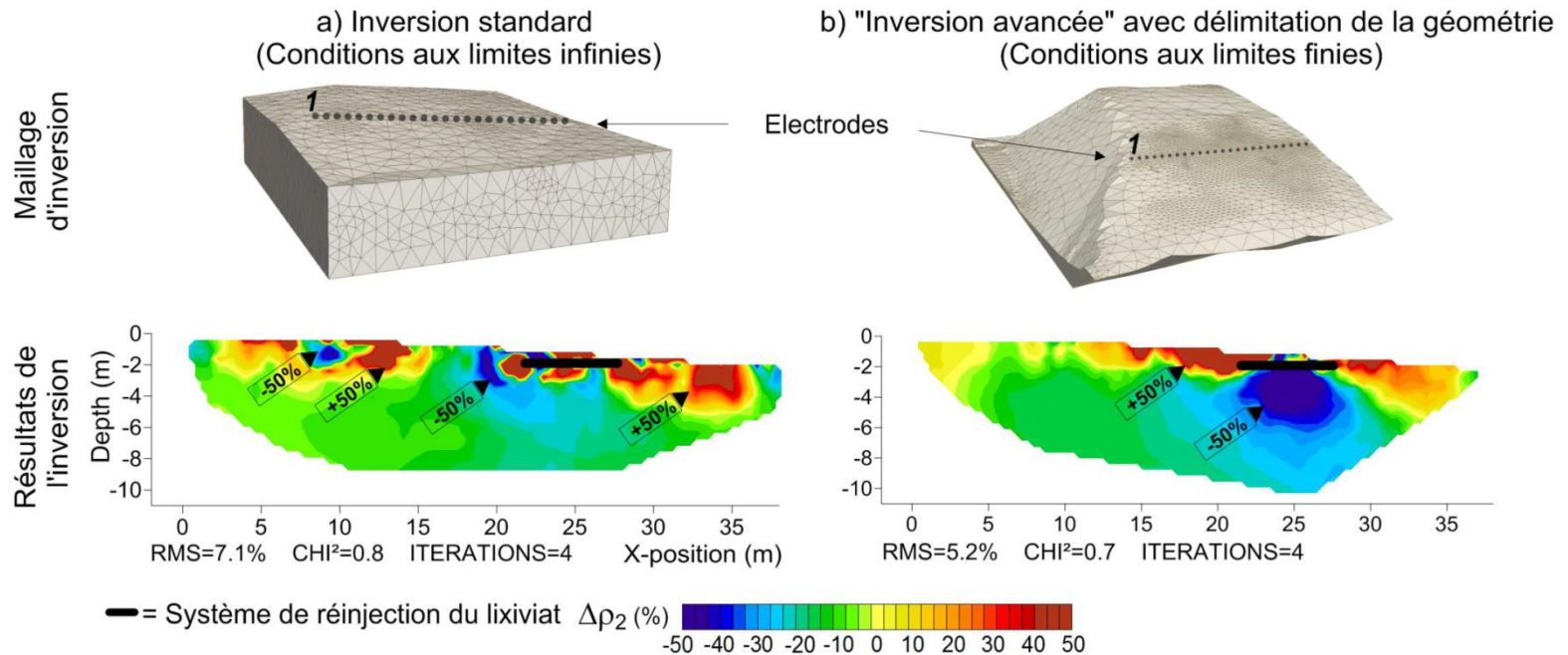


Mesures de résistivités électriques distribuées

Résistivité électrique (Ohm.m)

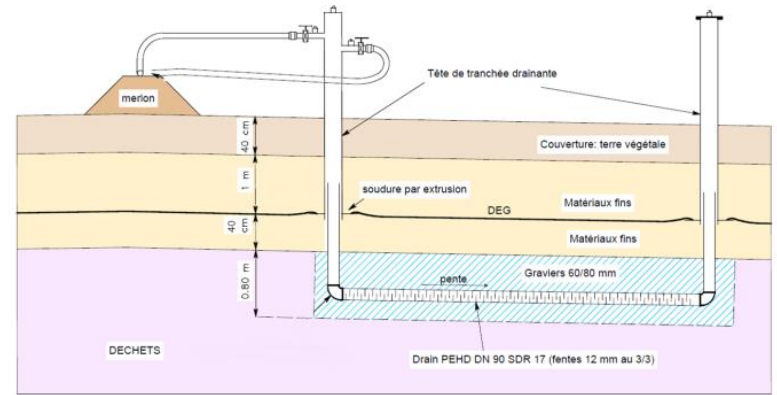
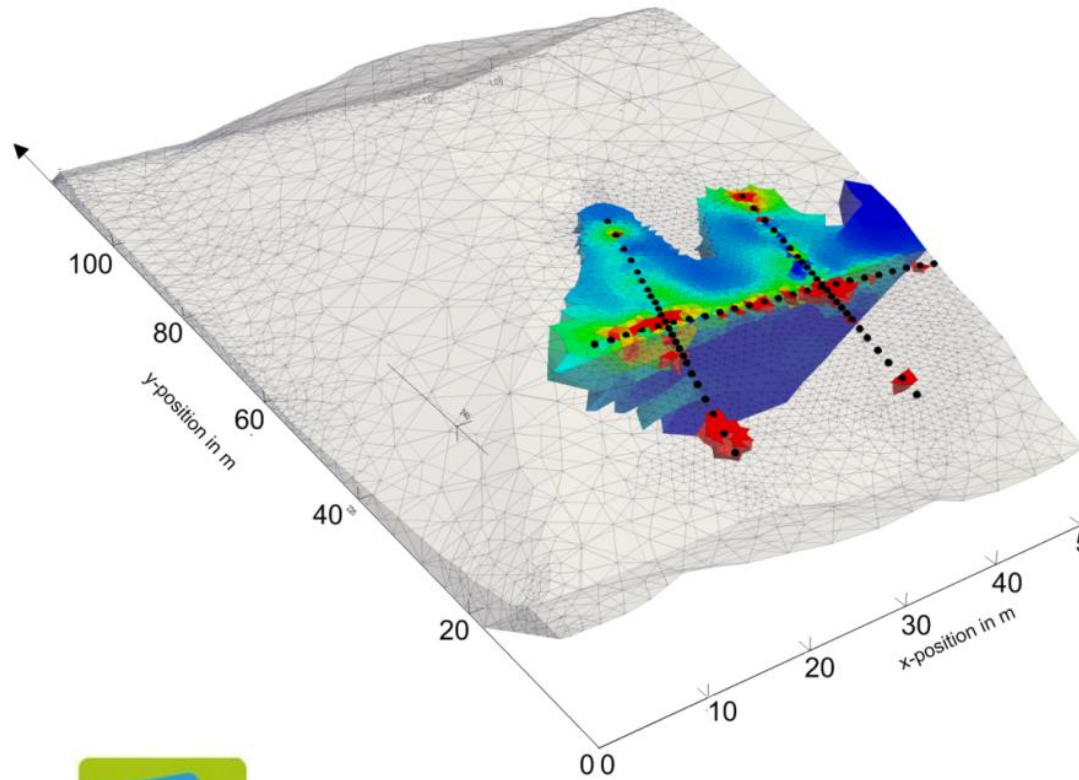


# Développements numériques ERT

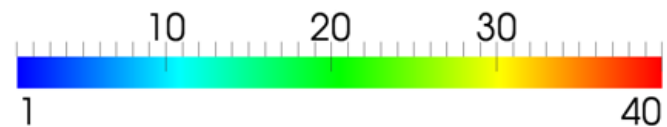


Amélioration de la robustesse de la méthode

# ERT 3D avant injection de lixiviat



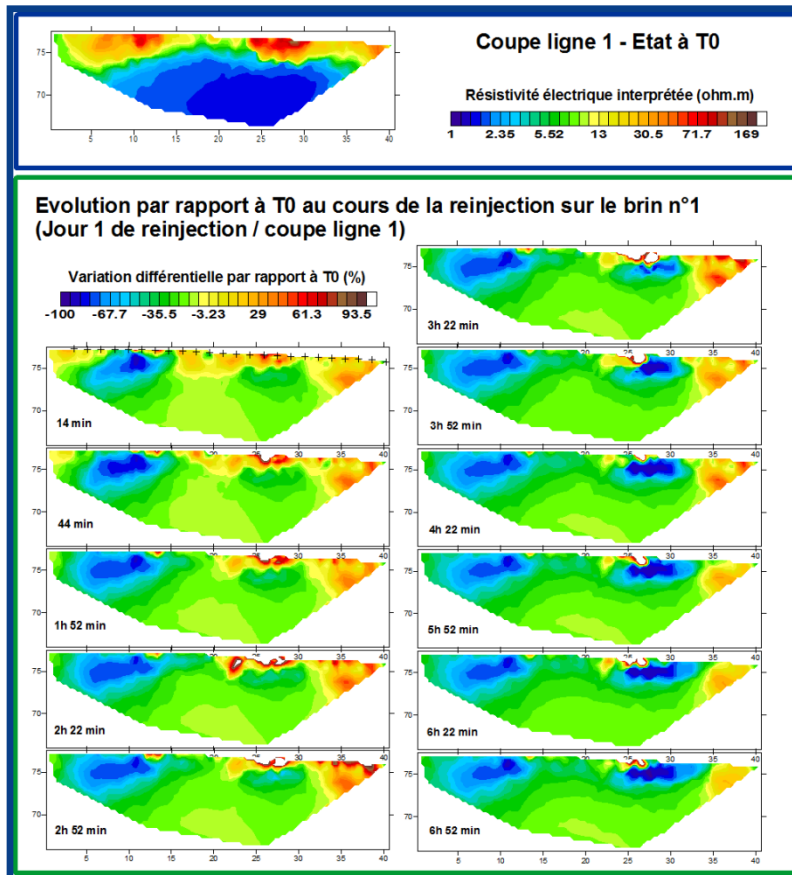
Résistivité électrique (Ohm.m)



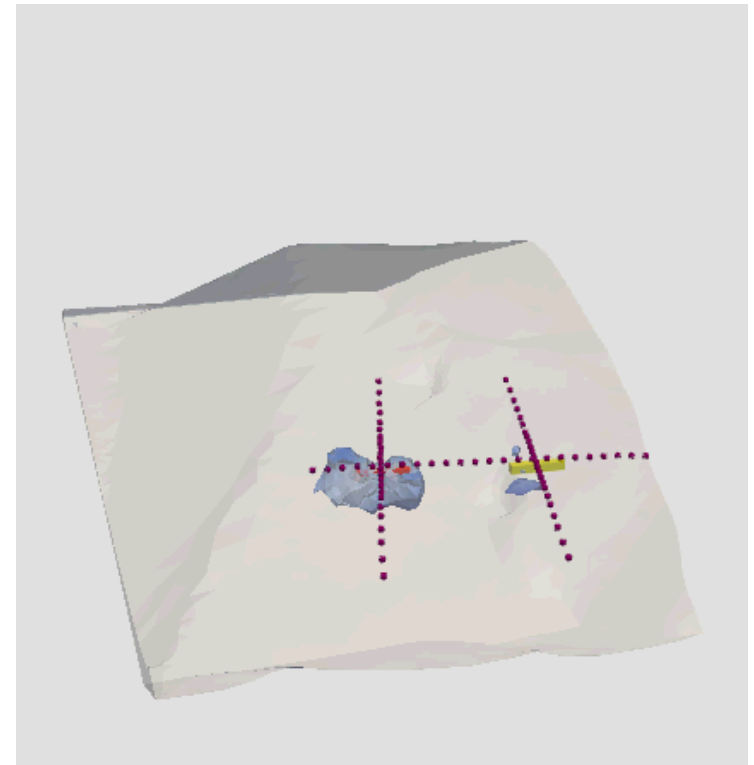
Volume de sensibilité et localisation des tranchées

# ERT 3D durant injection de lixiviat

## Evolution 2D

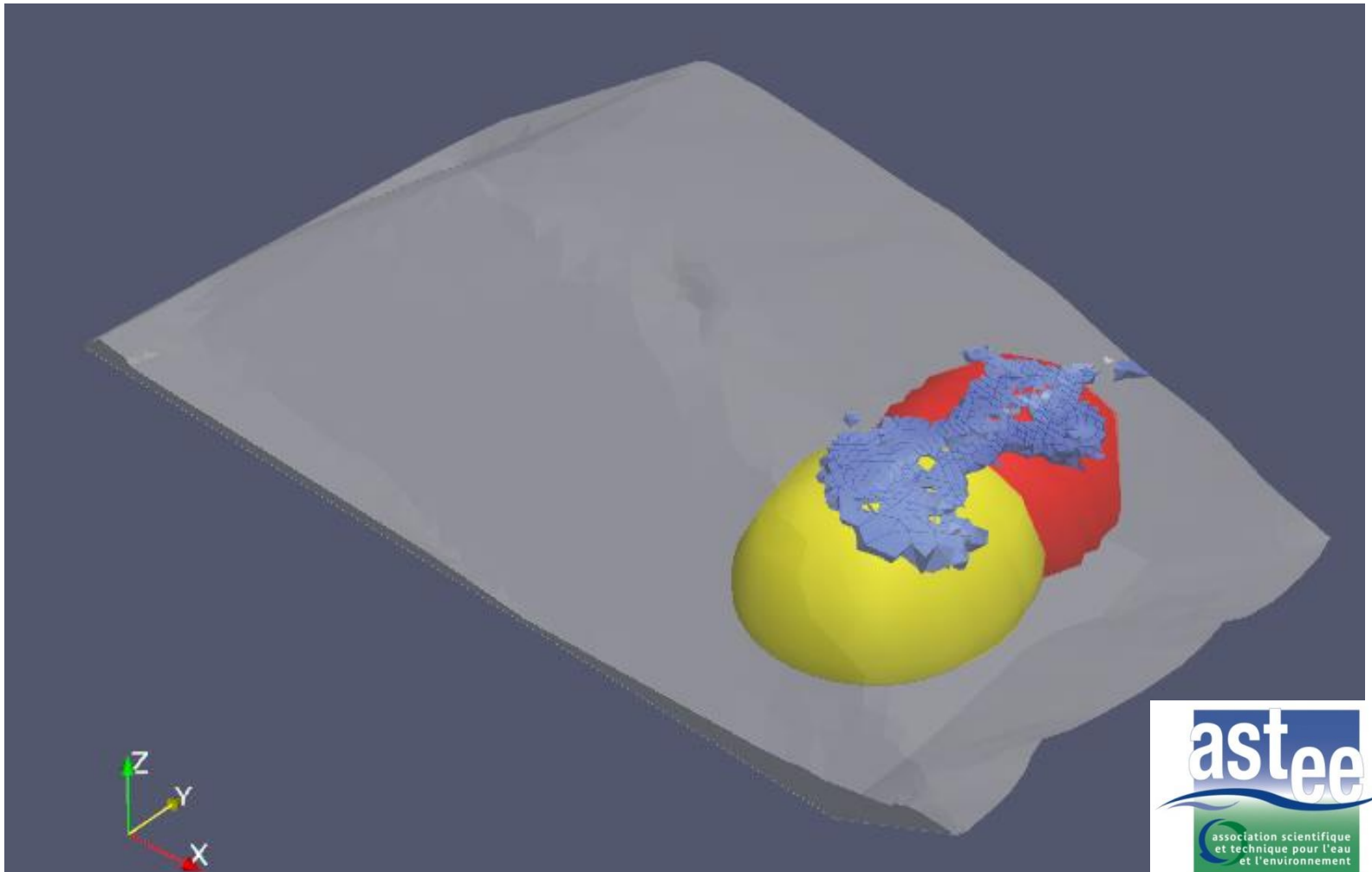


## Evolution 3D





## Comparaison des mesures ERT avec le dimensionnement





# Evaluation des performances des réseaux de réinjection du site

## Conclusions

### Résultats pour l'exploitant :

- évaluation du système de réinjection de lixiviat
- ajustement du dispositif d'injection sur les futurs casiers

### Résultats scientifiques :

- développement d'outils numériques pour accroître la robustesse de l'interprétation des mesures ERT
- fiabilisation de la détection de la zone impactée par une injection de lixiviat (non présenté)

### Principales limites:

- installation des électrodes avant fermeture du casier ou perforation de la géomembrane
- méthode complexe nécessitant des outils numériques



# Evaluation des performances des réseaux de réinjection du site

**Objectifs** : proposer une méthode alternative, simple et fiable

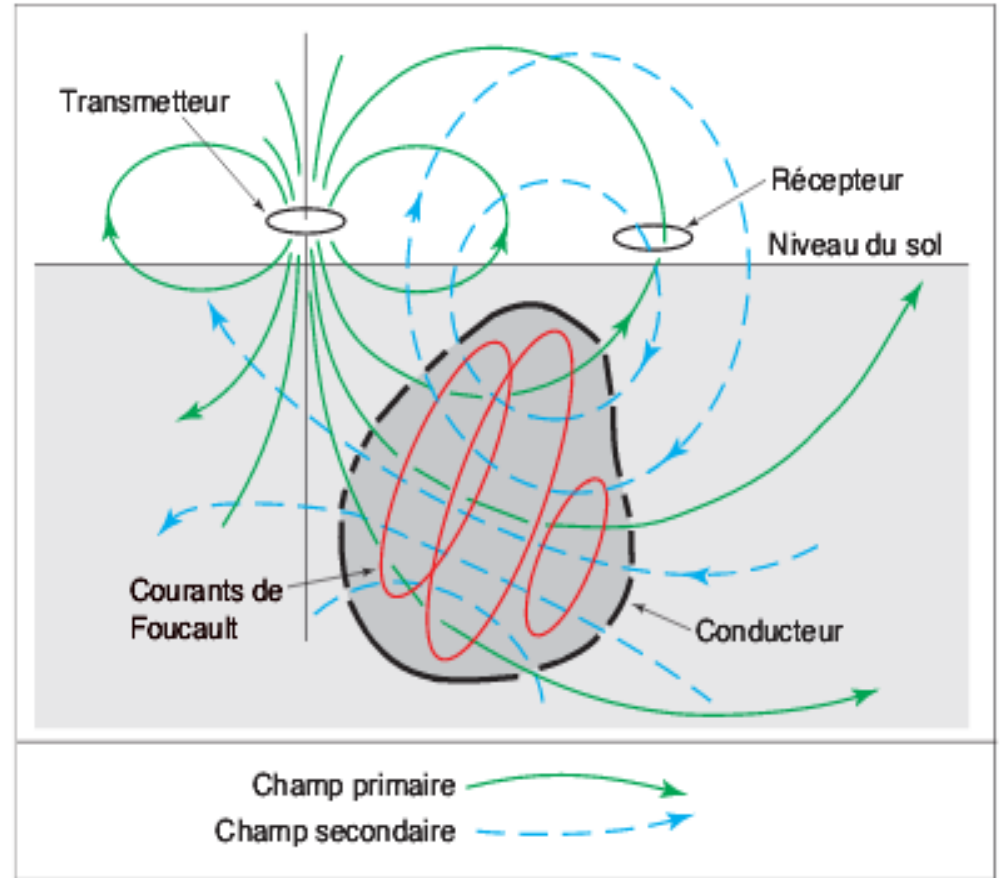
**Besoins** :

- installation et prospection rapide
- méthode de mesure sans contact
- non influencée par la géomembrane

**Méthode proposée** : mesure de la résistivité électrique par méthode électromagnétique fréquentielle (MEF)

Méthode robuste et simple MAIS 2D

# Suivi de réinjection de lixiviat par MEF



↑  
*Réalisation de mesure  
 électromagnétique avec une EM31  
 lors d'une réinjection de lixiviat*



Journée scientifique et technique bioréacteur  
 Cuves – 20 juin 2014



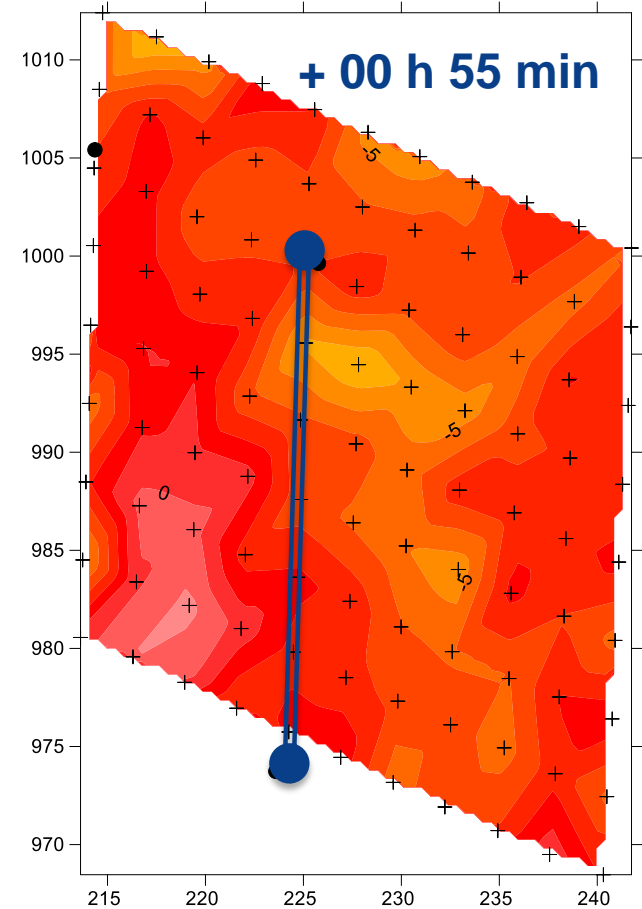


# Suivi de réinjection de lixiviat par MEF

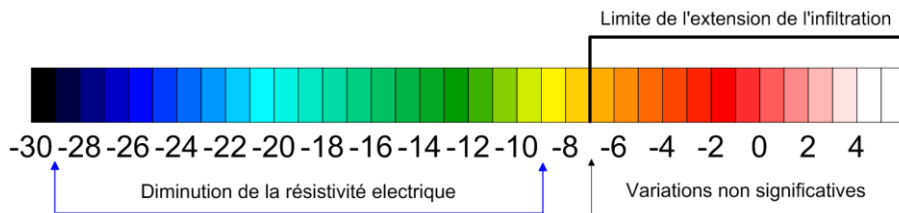


Réalisation de mesure électromagnétique avec une EM31 lors d'une réinjection de lixiviat

Position-Y



Position-X

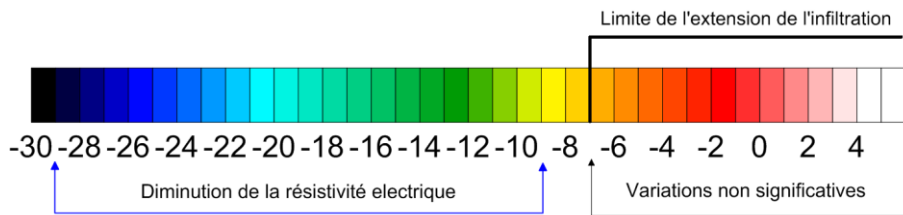
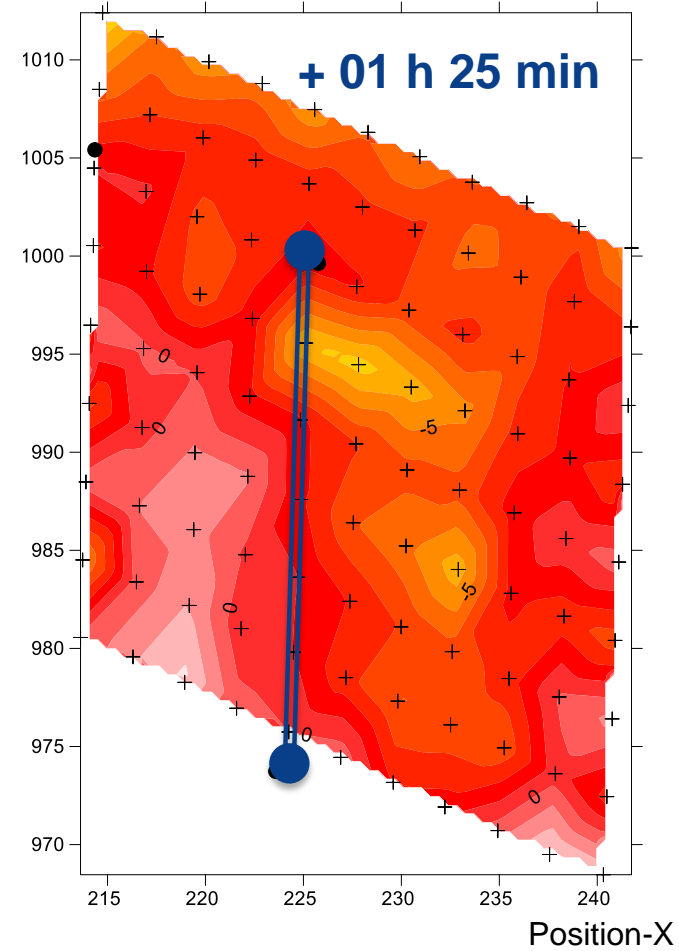


Pourcentage de variation de la résistivité électrique

# Suivi de réinjection de lixiviat par MEF

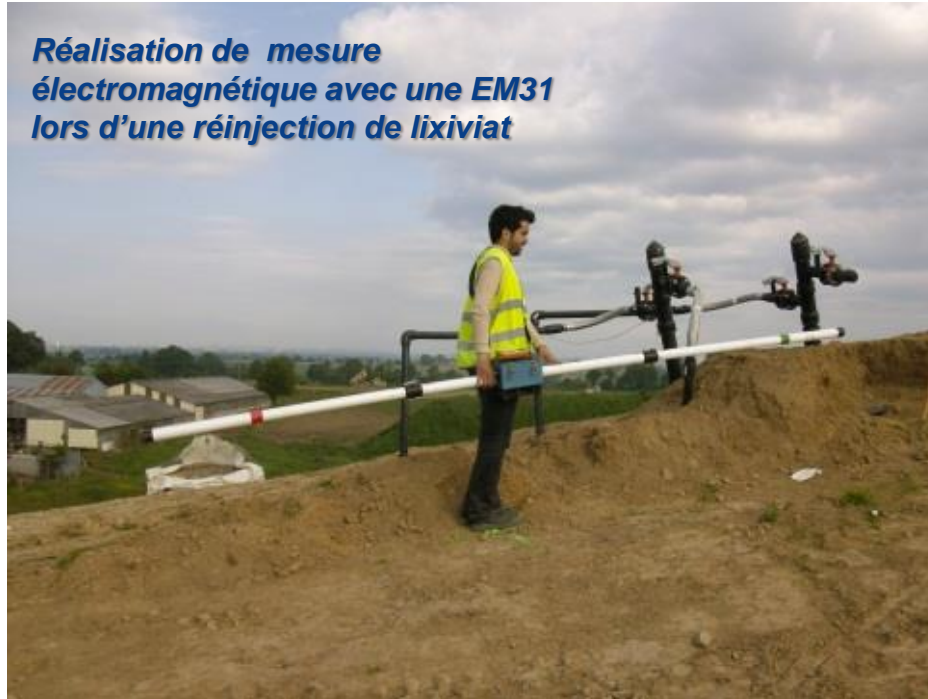


Position-Y

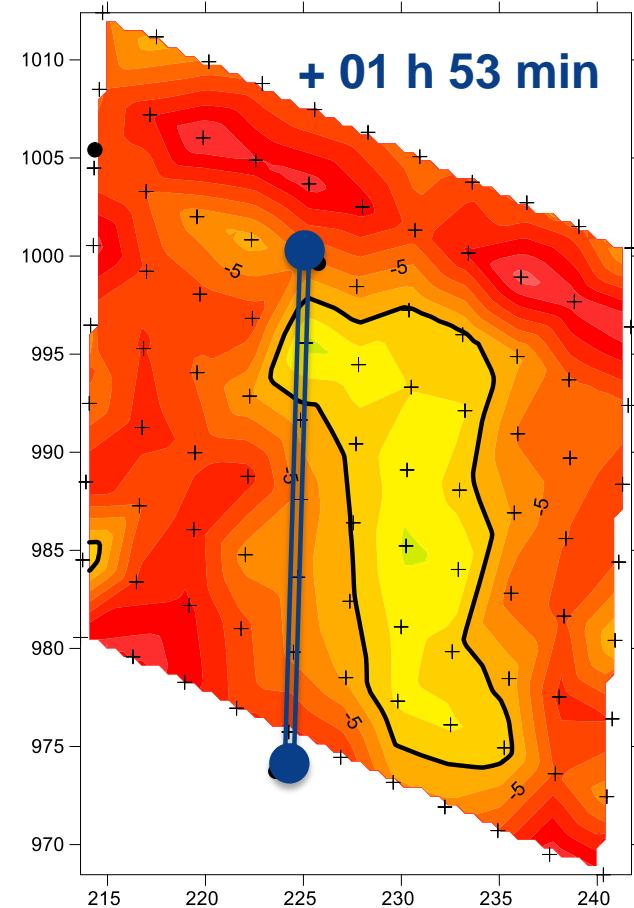


Pourcentage de variation de la résistivité électrique

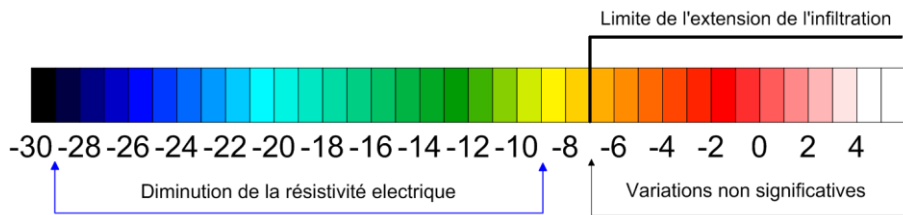
# Suivi de réinjection de lixiviat par MEF



Position-Y

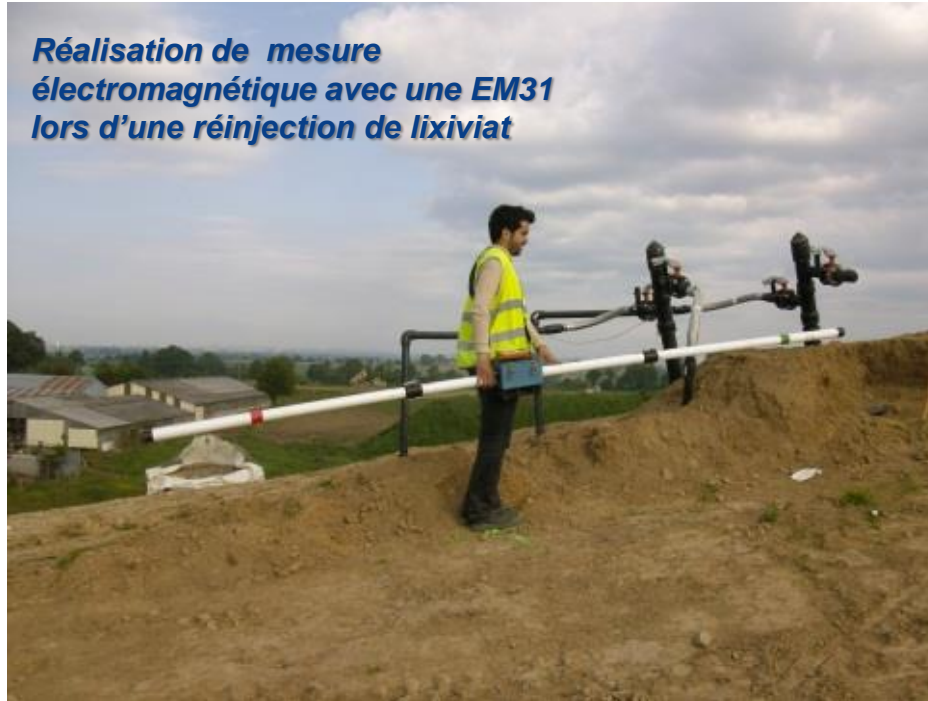


Position-X

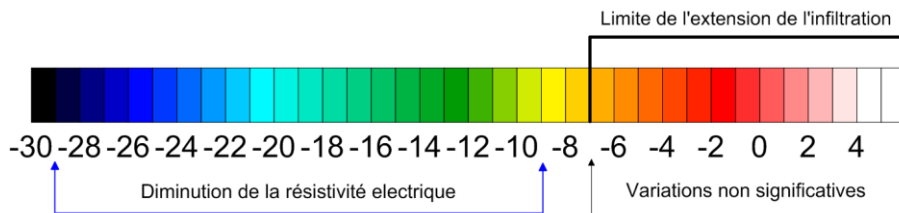
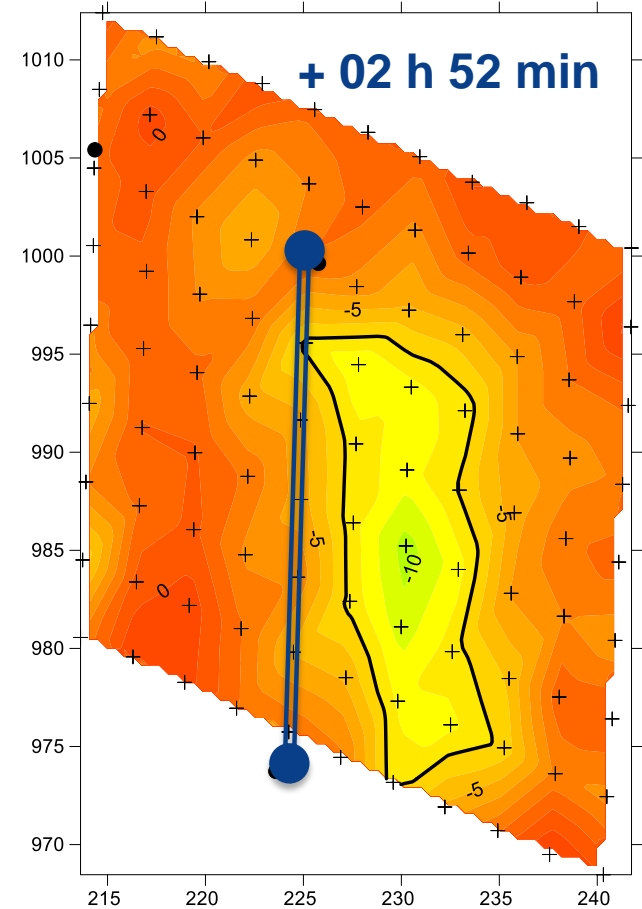


Pourcentage de variation de la résistivité électrique

# Suivi de réinjection de lixiviat par MEF



Position-Y



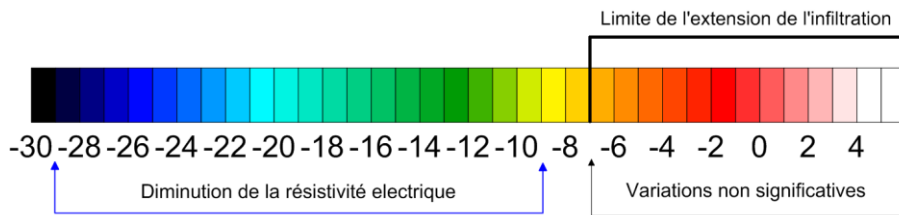
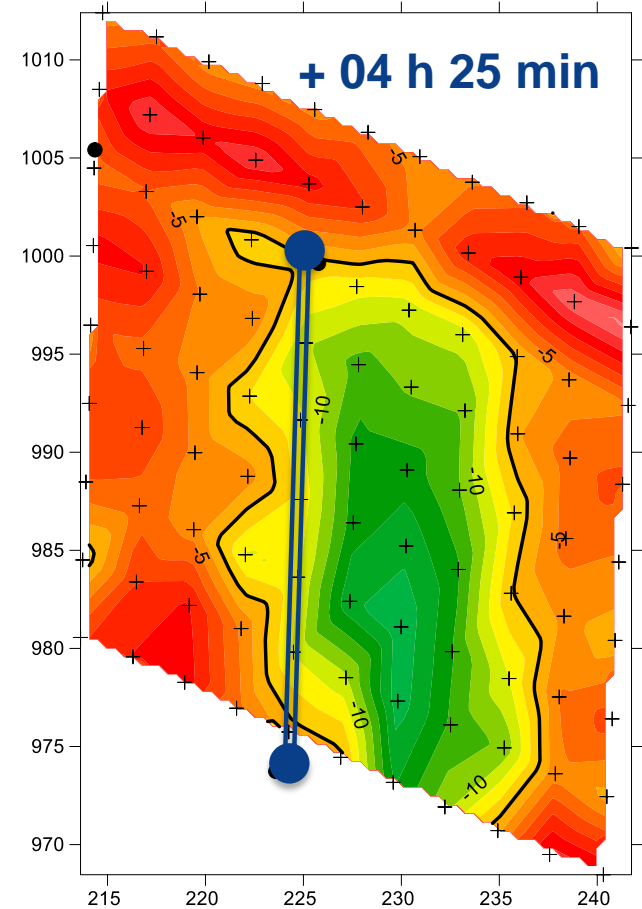
Pourcentage de variation de la résistivité électrique



# Suivi de réinjection de lixiviat par MEF



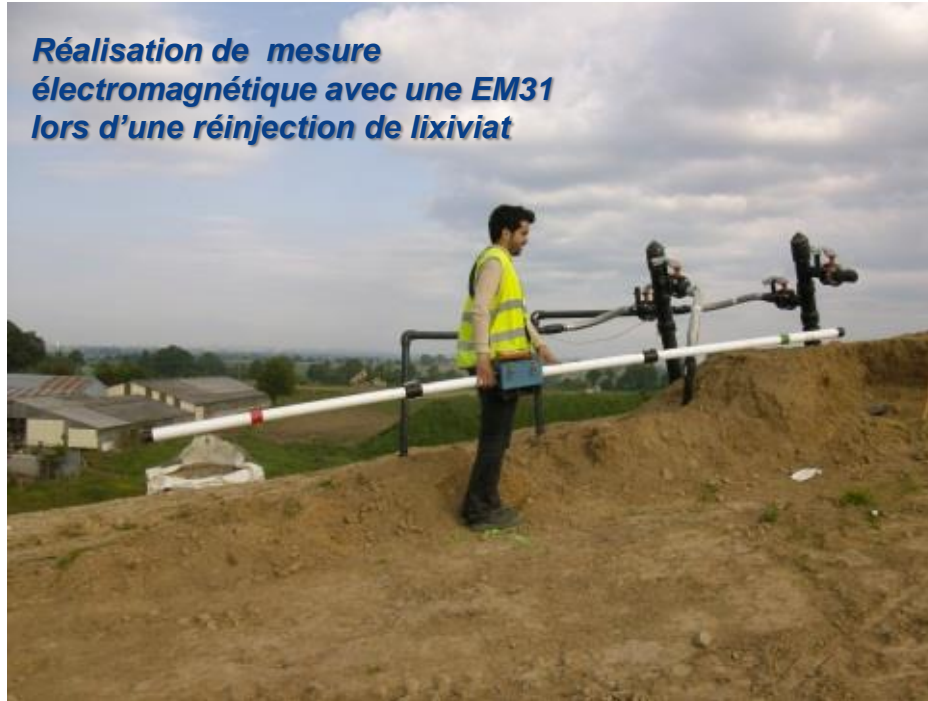
Position-Y



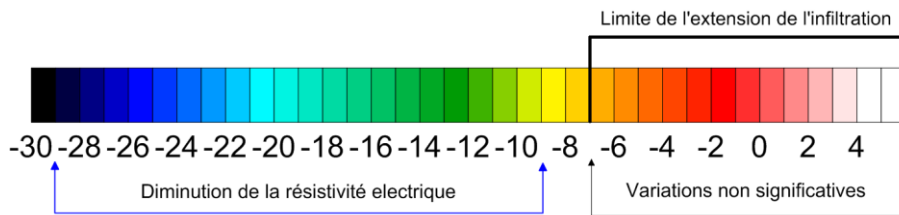
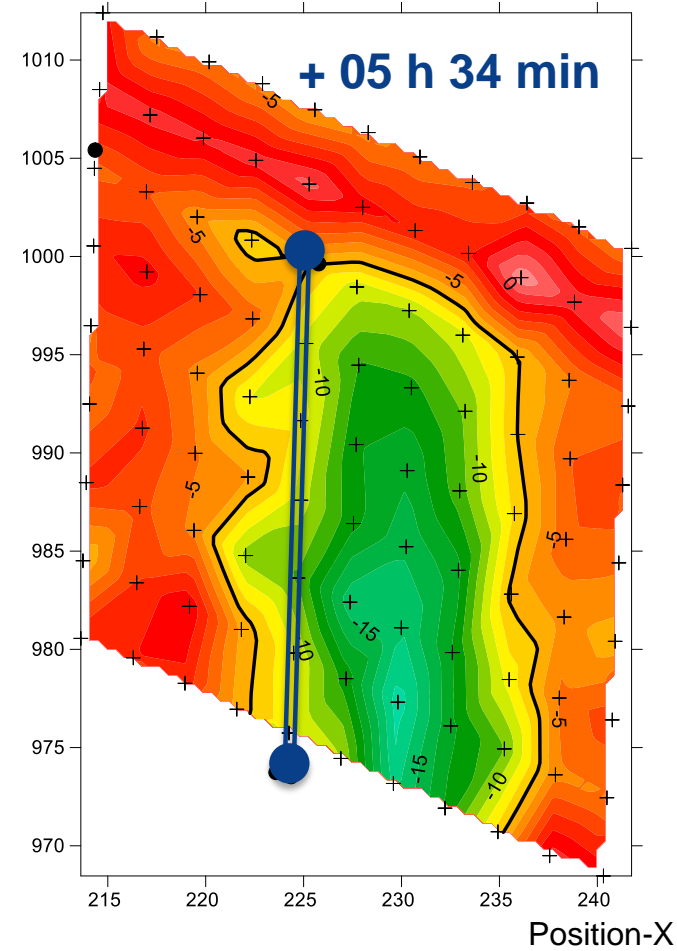
Pourcentage de variation de la résistivité électrique



# Suivi de réinjection de lixiviat par MEF



Position-Y

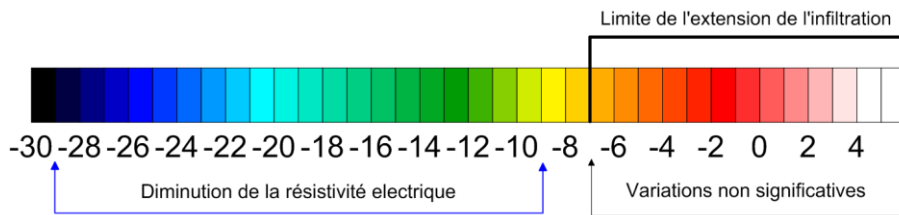
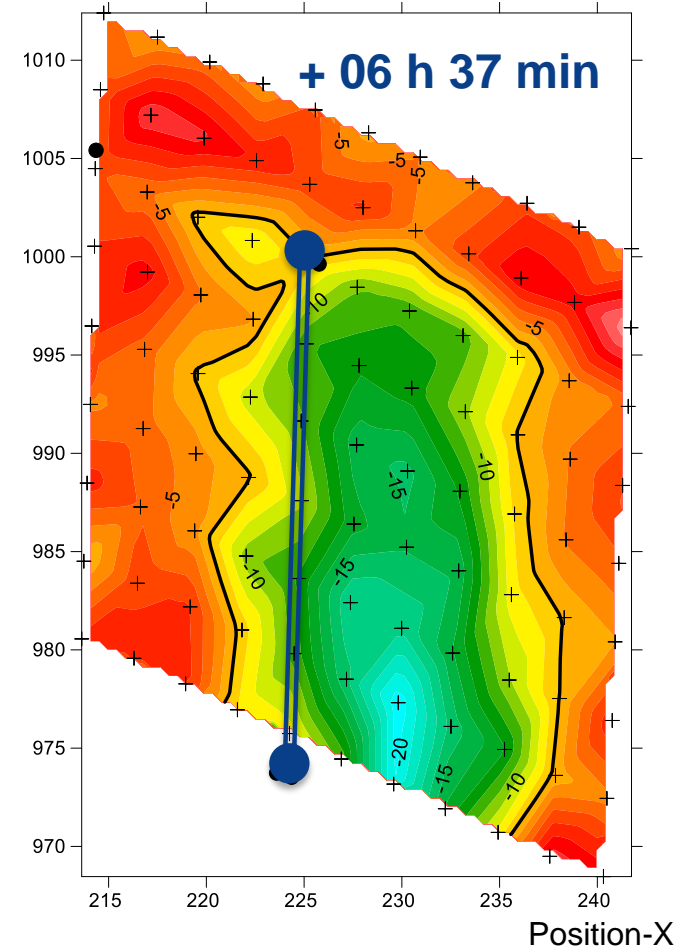


Pourcentage de variation de la résistivité électrique

# Suivi de réinjection de lixiviat par MEF

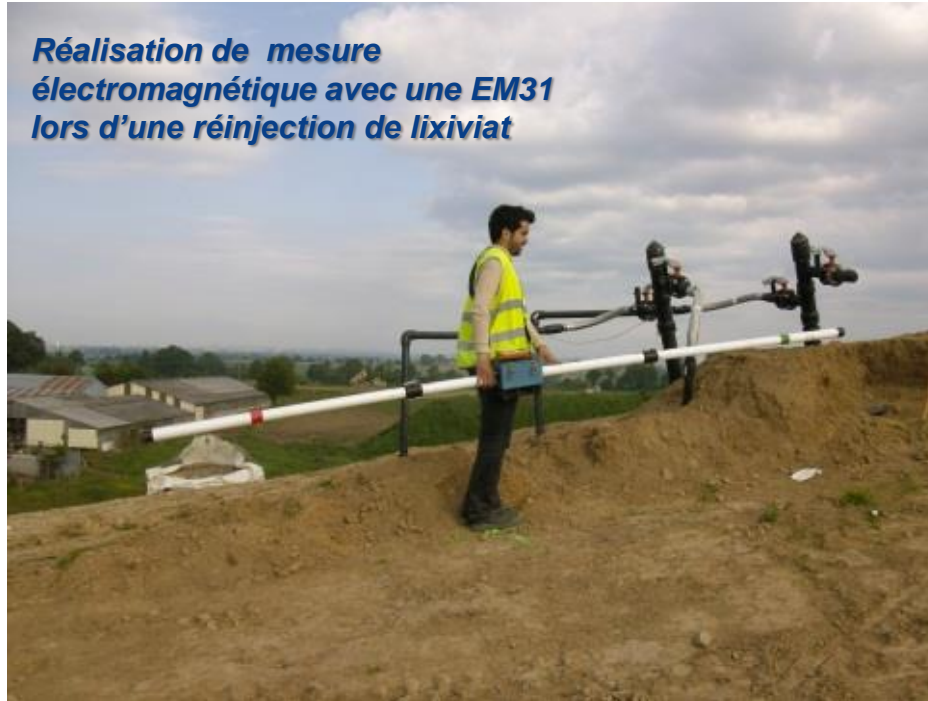


Position-Y

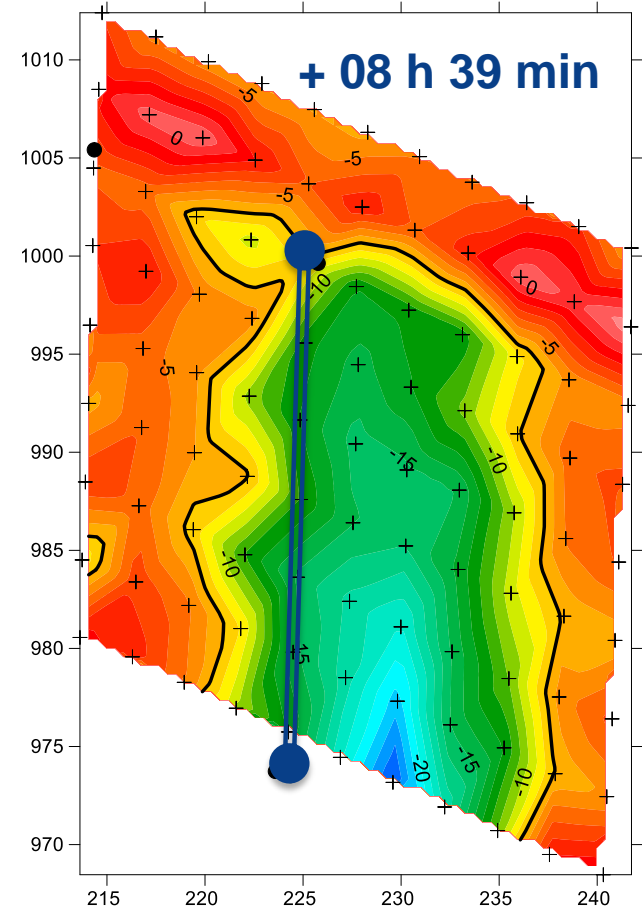


Pourcentage de variation de la résistivité électrique

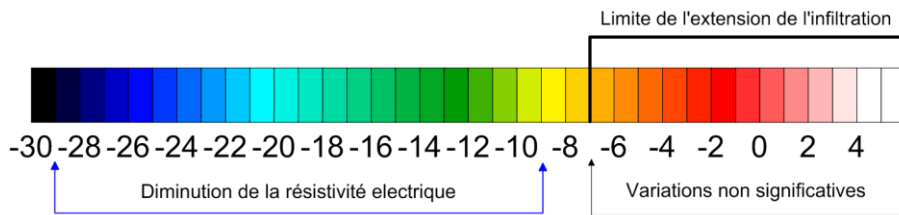
# Suivi de réinjection de lixiviat par MEF



Position-Y



Position-X



Pourcentage de variation de la résistivité électrique





## Suivi de réinjection de lixiviat par MEF

### Conclusions

#### Résultats pour l'exploitant :

- évaluation du système de réinjection de lixiviat
- ajustement du dispositif d'injection sur les futurs casiers

#### Résultat scientifique :

- développement d'un protocole de mesure en suivi temporel (correction du bruit, et dérive instrumentale)

#### Principales limites:

- l'épaisseur de la couverture ne doit pas excéder 1.2 m
- profondeur d'investigation limitée à 5m

#### Principaux avantages:

- faible coût
- facilité de mesure et d'interprétation



# Stratégies de réinjection pour optimiser la production de biogaz

**Objectifs** : tester différentes stratégies de réinjection au laboratoire (volume / fréquence / nature effluent)

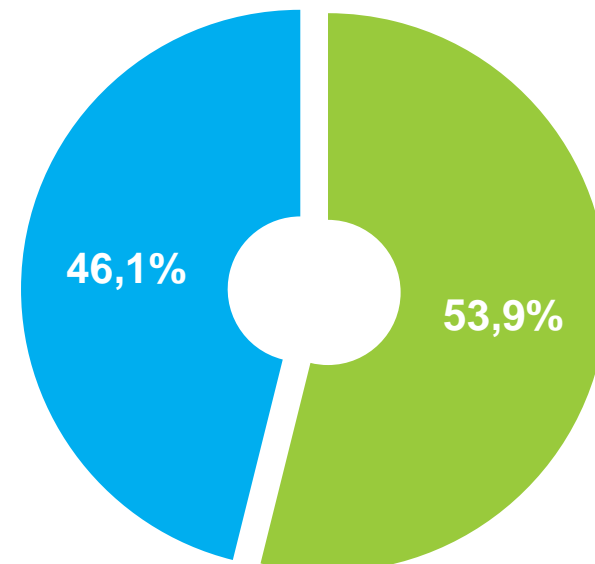
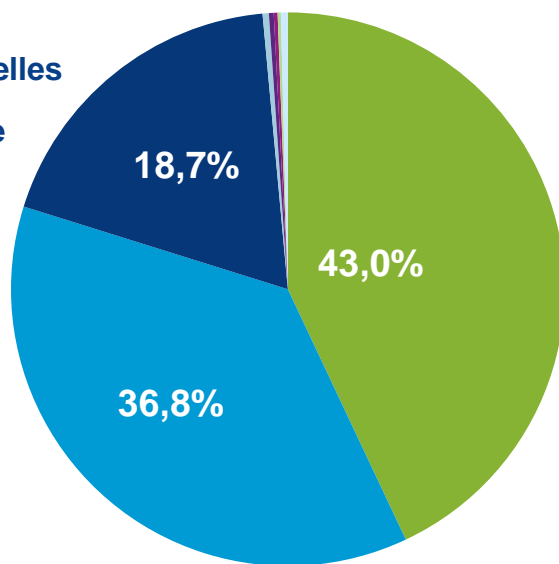
**Applications** :

- création d'un déchet représentatif du site
- mise en œuvre de réacteurs de laboratoire pour simuler différentes conditions applicables *in situ*
- suivi de la biodégradation des déchets (volume et nature des biogaz)

# Stratégies de réinjection pour optimiser la production de biogaz

Création d'un déchet représentatif du site

- Déchets Industriels Ultimes
- Ordures Ménagères Résiduelles
- Encombrants de déchetterie
- DIB
- Sciure de bois
- Boues de STEP
- Bois
- Plâtre et Placoplatre
- Polystyrène
- Refus de Bâtiment de tri



Journée scientifique et technique bioréacteur  
Cuves – 20 juin 2014



# Stratégies de réinjection pour optimiser la production de biogaz

Création d'un déchet représentatif du site



teneur en eau massique humide déchet collecté : 0,43 kg/kg

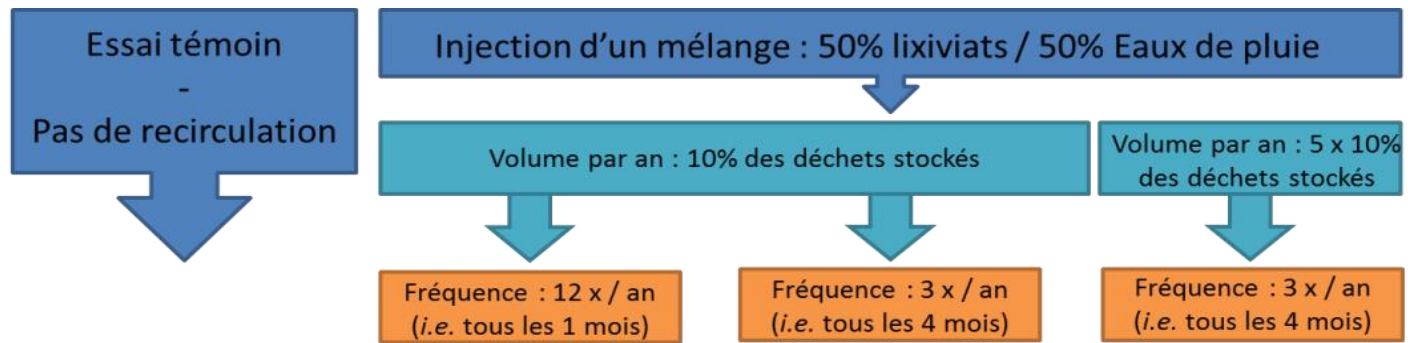
teneur en eau massique humide déchet fin exploitation : 0,58 kg/kg

densité du déchet 0,450 T/m<sup>3</sup>

température expérimentale : 35 ° C



# Stratégies de réinjection pour optimiser la production de biogaz



C3



C4



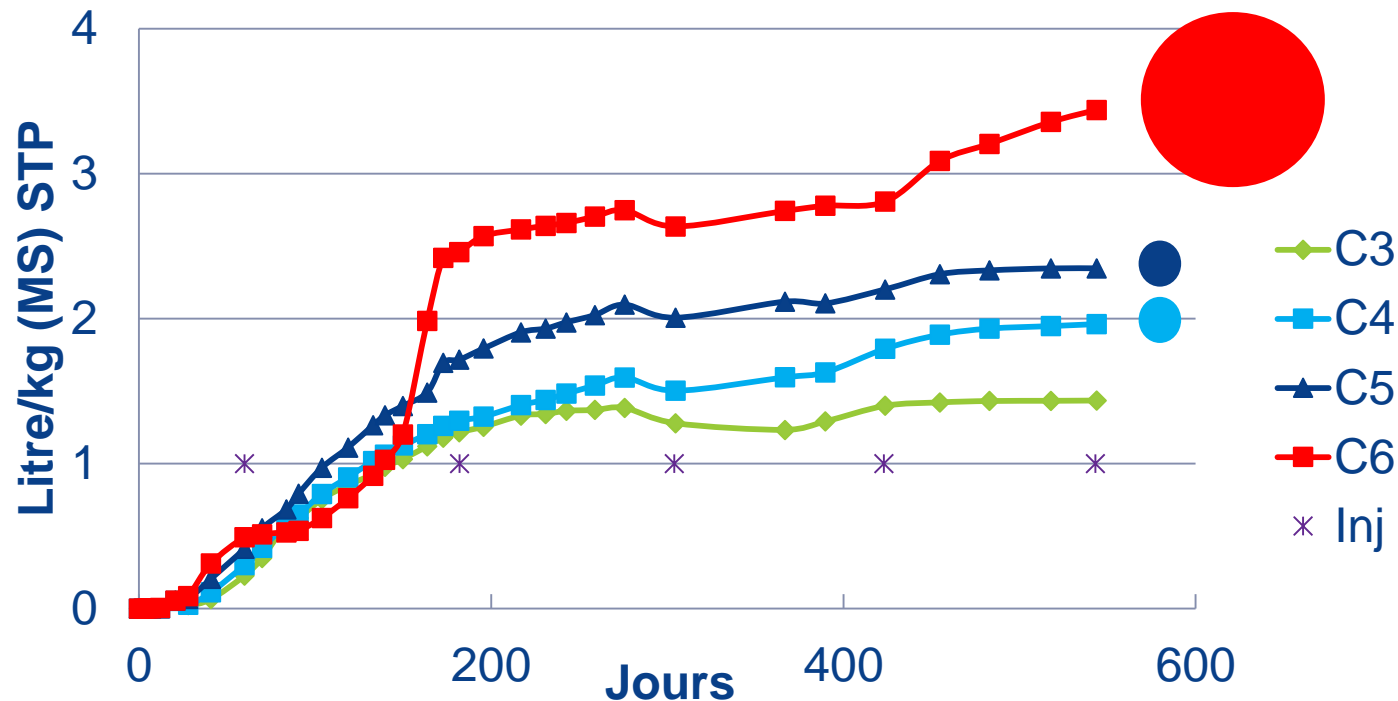
C5



C6

# Stratégies de réinjection pour optimiser la production de biogaz

## Production de CH<sub>4</sub> cumulée



Potentiel méthanogène	Moyenne (L/kg de MS)	Ecart type (L/kg de MS)
Déchets reconstitués	71.94	8.94



# Suivi de l'évolution de la biodégradation à long terme

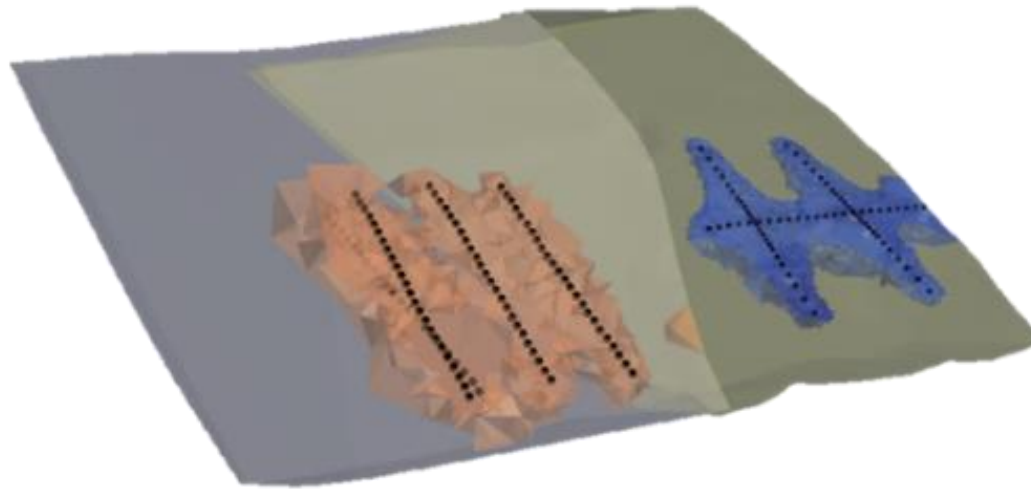
**Objectifs:** disposer d'informations spatialisées pour suivre l'évolution des processus de biodégradation (température, tassement,...)

## Applications :

- Mise en œuvre de méthodes de mesures *in situ*
- Suivi de la biodégradation des déchets (volume et nature des biogaz et lixiviats, tassements, ...)

# Suivi de l'évolution de la biodégradation à long terme

Casier n°3

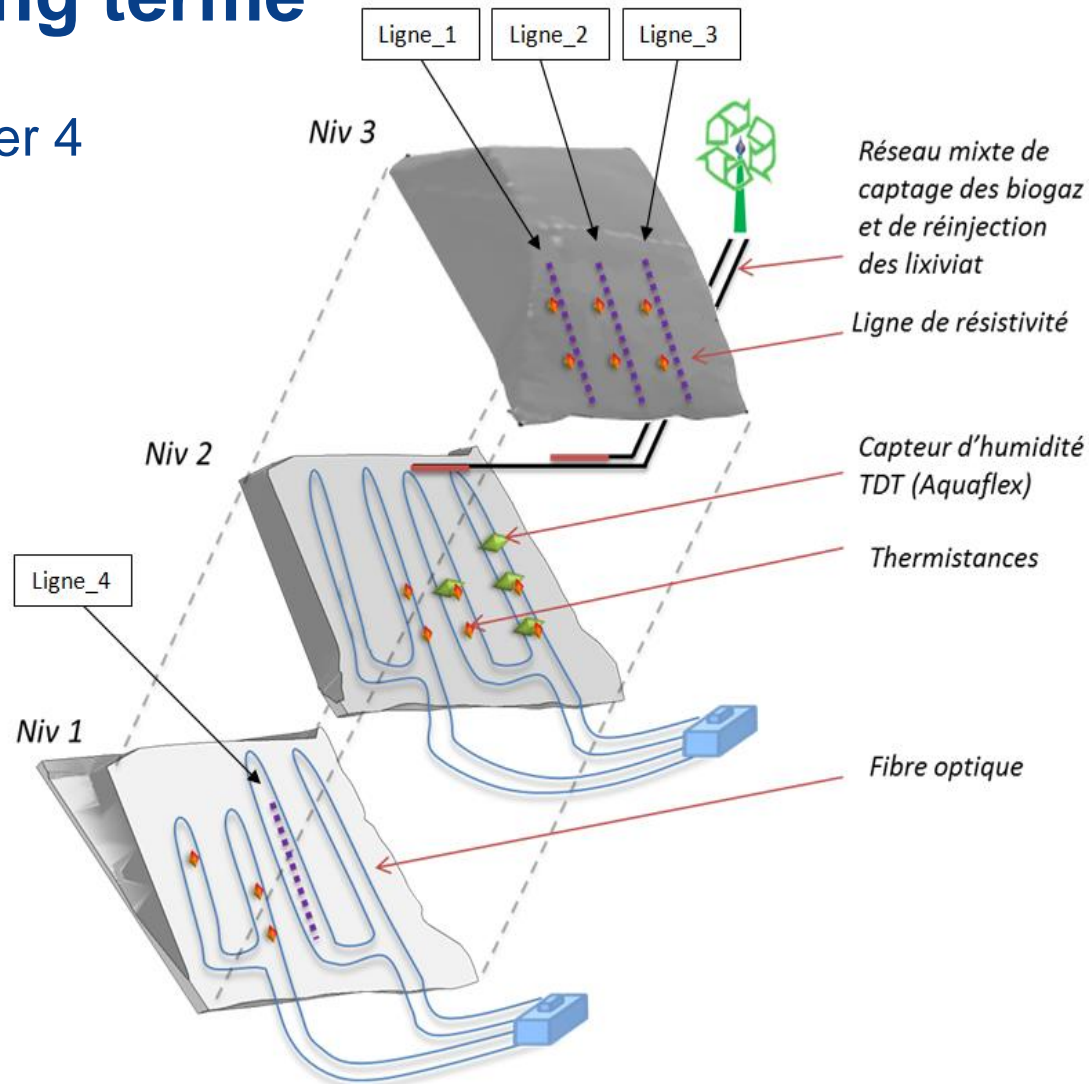


Casier n°4



# Suivi de l'évolution de la biodégradation à long terme

Casier 4



# Installation sur site



**Etape 1** : Création de la tranchée et dépôt d'une couche de sable

**Etape 2** : Installation de la fibre optique et des autres équipements

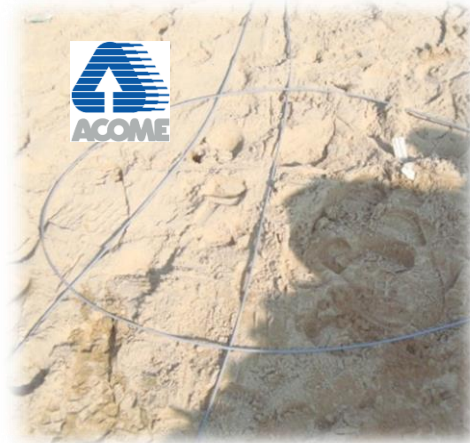
**Etape 3** : Couverture avec une couche de sable et un géotextile

**Etape 4** : Fermeture de la tranchée avec les déchets excavés lors de sa création.

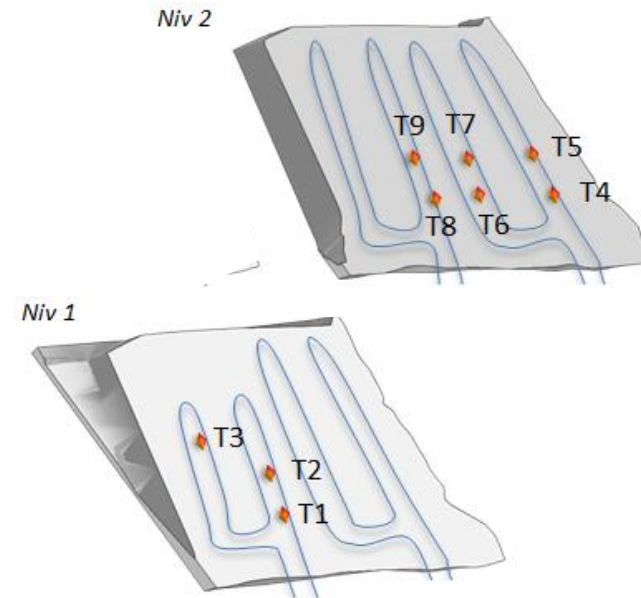
# Mesures de température réalisées avec les capteurs de fibre optique



(1)



(2)



- (1) Capteur fibre optique installé dans une tranchée  
 (2) Capteur fibre optique  
 (3) Acquisition de données (DTS sensornet)

- 1 m de résolution spatiale
- 0,01 ° C de résolution
- 0,5 ° C de précision



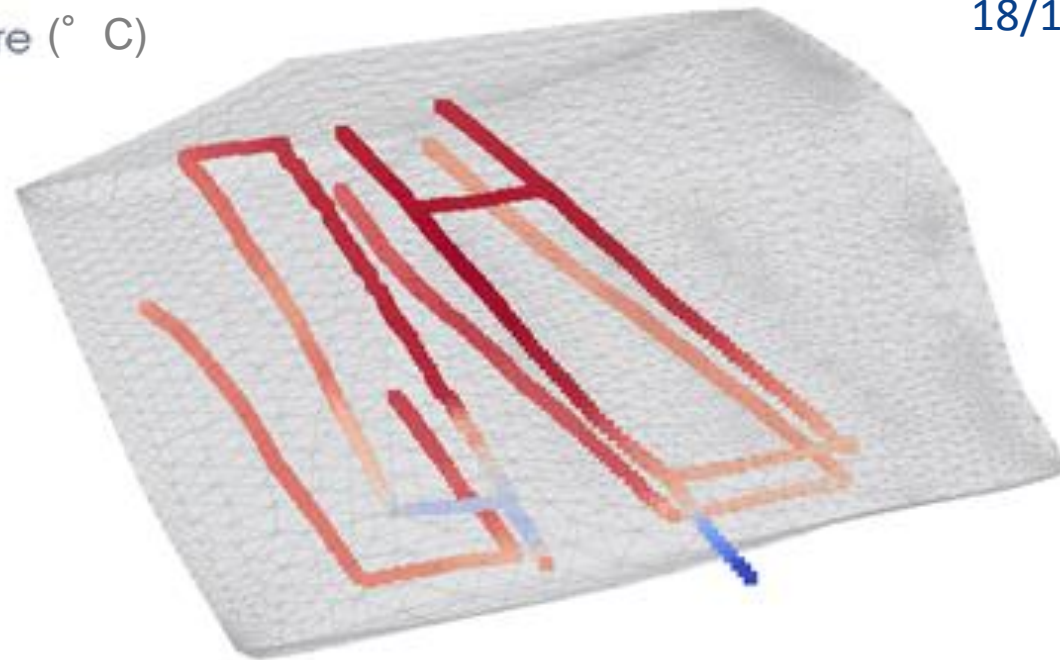
(3)



# Mesures de température réalisées avec les capteurs de fibre optique

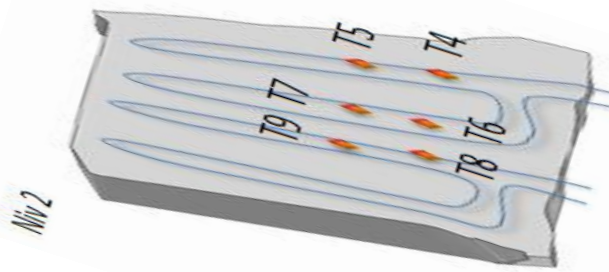
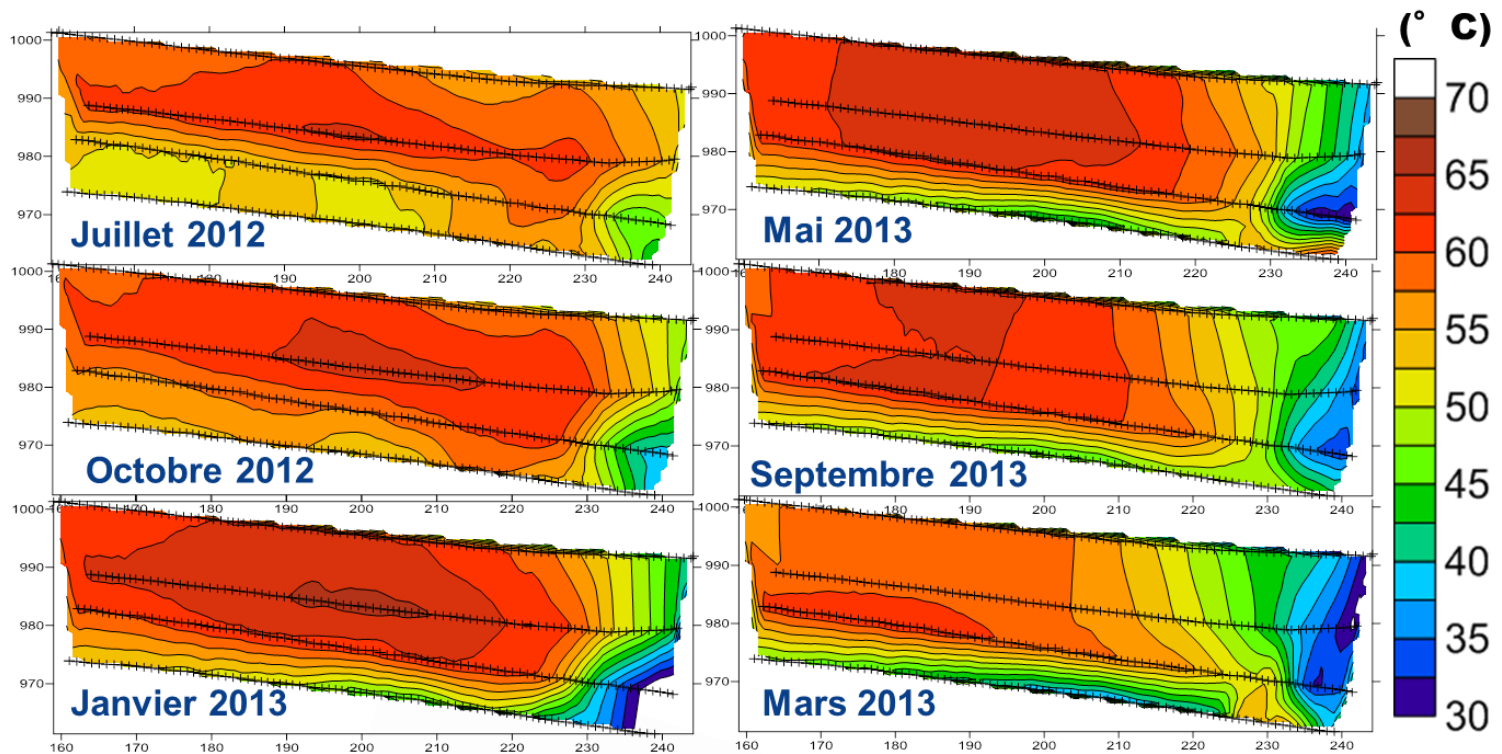
18/12/2012

Temperature (° C)



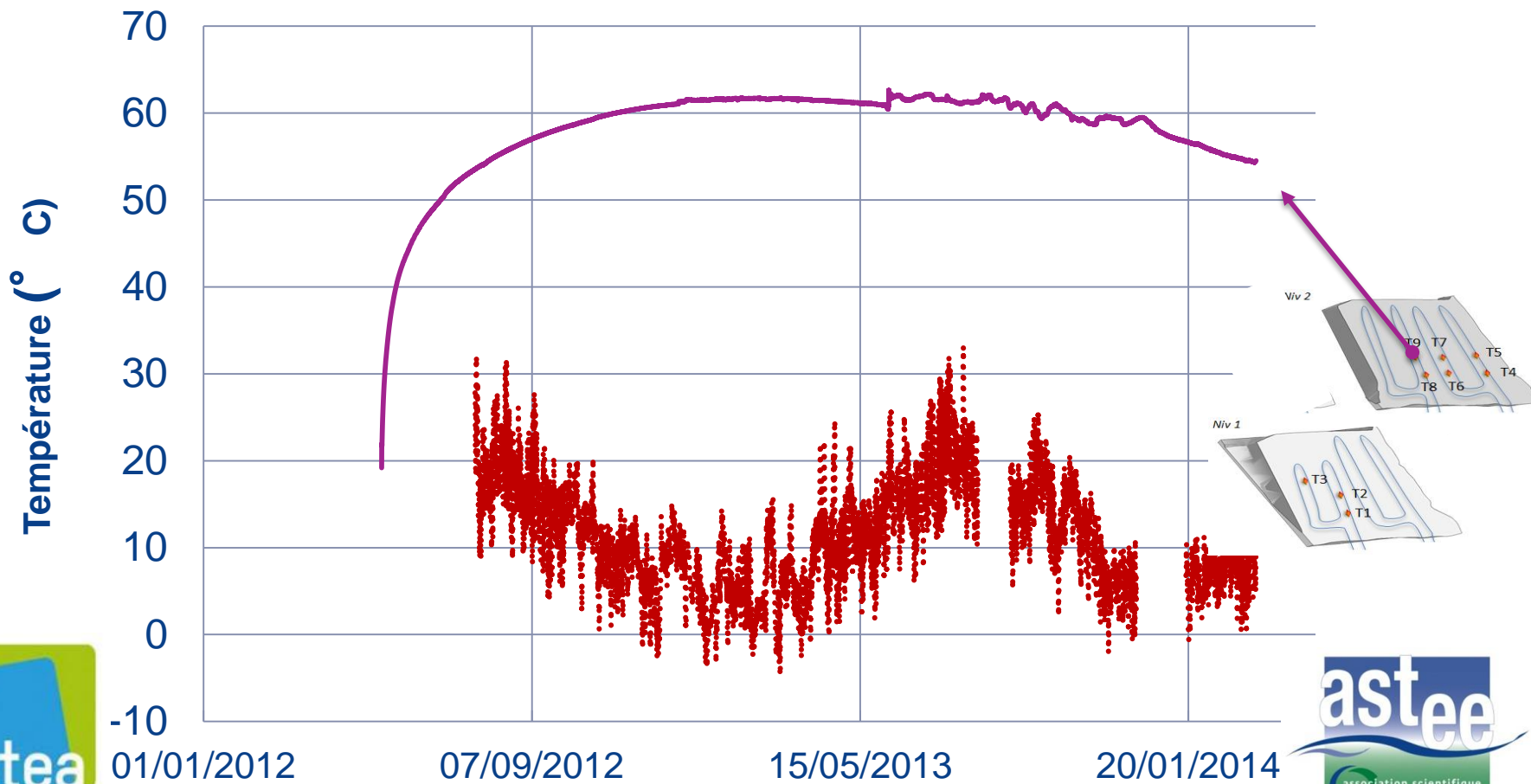


# Mesures de température réalisées avec les capteurs de fibre optique



# Mesures ponctuelles de température

## Casier 4





# Suivi de l'évolution de la biodégradation à long terme

## Conclusions

### Résultats pour l'exploitant :

- constitution d'une base de données (2 années de suivi)

### Résultats scientifiques :

- observation de la distribution de la température au sein du massif de déchets
- acquisition de mesures de résistivité électrique corrigées en température (non présenté)

# Perspectives à ce programme de recherche

**Poursuivre la collecte de données *in situ* :**

- résistivité électrique ;
- température ;
- tassement ;
- lixiviat et biogaz ;

**pour constituer une base de données**

**..... et les expérimentations au laboratoire**

**pour l'étude des stratégies de réinjection de lixiviat.**



Journée scientifique et technique bioréacteur  
Cuves – 20 juin 2014





## Perspectives à ce programme de recherche

Dans le cadre de l'évaluation de la stabilité fonctionnelle des installations de stockage de déchets non dangereux :

- reconduire des essais de réinjection de lixiviat pour les comparer dans l'objectif d'évaluer l'évolutions hydro-mécaniques du déchets
- évaluer la méthode de mesure de la polarisation provoquée pour suivre la biodégradation des déchets (2 années de données enregistrées non analysées)
- explorer les méthodes électromagnétiques multi-fréquentielles : outils à développer.



Journée scientifique et technique bioréacteur  
Cuves – 20 juin 2014



# Merci de votre attention



UNICAEN  
université de Caen  
Basse-Normandie

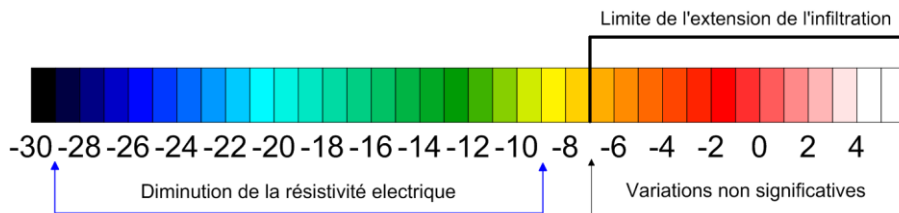
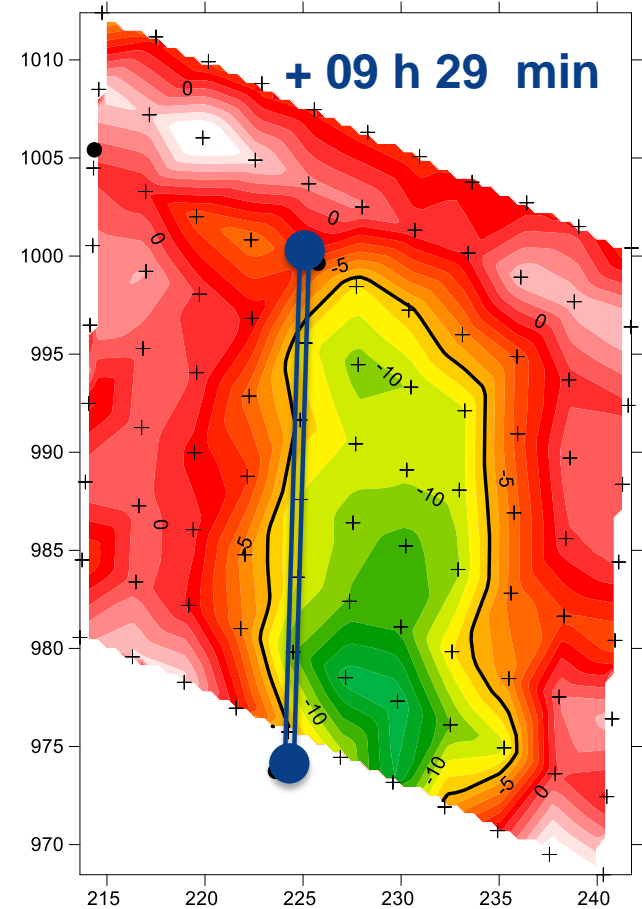
Journée scientifique et technique bioréacteur  
Cuves – 20 juin 2014



# Suivi de réinjection de lixiviat par MEF



Position-Y



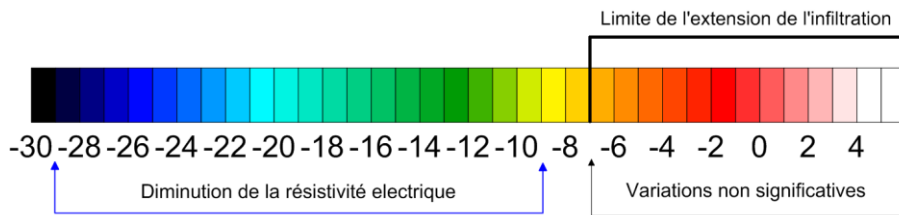
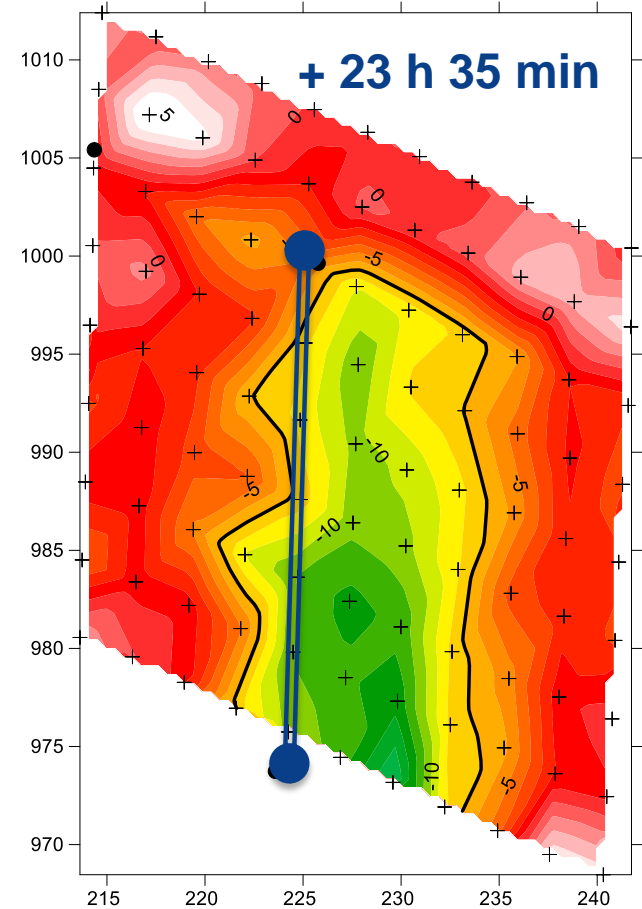
Pourcentage de variation de la résistivité électrique



# Suivi de réinjection de lixiviat par MEF



Position-Y



Pourcentage de variation de la résistivité électrique