



**HAL**  
open science

# Application de la mesure de résistivité électrique pour étudier la circulation diphasique lixiviat-biogaz à travers un essai de laboratoire sur du déchet non dangereux

Benoit Duval

## ► To cite this version:

Benoit Duval. Application de la mesure de résistivité électrique pour étudier la circulation diphasique lixiviat-biogaz à travers un essai de laboratoire sur du déchet non dangereux. Sciences de l'environnement. 2013. hal-02605648

**HAL Id: hal-02605648**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02605648>**

Submitted on 16 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Unité de recherche Hydrosystèmes et bioprocédés  
HBAN  
Equipe de recherche technologique Mesures  
Physiques pour les Milieux Poreux

IRSTEA  
1 rue Pierre-Gilles de Gennes  
CS 10030  
92761 Antony cedex

*Application de la mesure de  
résistivité électrique pour étudier la  
circulation diphasique lixiviat-biogaz  
à travers un essai de laboratoire sur  
du déchet non dangereux.*

**Maître de stage : M. Sylvain MOREAU**

**Tuteur : M. Stéphane GARAMBOIS**

**M. Benoît DUVAL**

**Soutenance  
Septembre 2013**



## Master Sciences de la Terre et de l'Environnement

### Attestation de non plagiat

Je soussigné DUVAL Benoît

Auteur du mémoire :

**« Application de la mesure de résistivité électrique pour étudier la circulation diphasique lixiviat-biogaz à travers un essai de laboratoire sur du déchet non dangereux. »**

Déclare sur l'honneur que ce mémoire est le fruit d'un travail personnel et que je n'ai ni contrefait, ni falsifié, ni copié tout ou partie de l'œuvre d'autrui afin de la faire passer pour la mienne.

Toutes les sources d'information utilisées et les citations d'auteur ont été mentionnées conformément aux usages en vigueur.

Je suis conscient(e) que le fait de ne pas citer une source ou de ne pas la citer clairement et complètement est constitutif de plagiat, que le plagiat est considéré comme une faute grave au sein de l'Université, pouvant être sévèrement sanctionnée par la loi.

Fait à ANTONY,

Le 20/08/2013

Signature de l'étudiant(e)

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'B. Duval', written on a light-colored background.

# Résumé

---

La protection de notre environnement est un enjeu majeur que l'on ne cesse d'essayer d'améliorer. Le secteur de la gestion des déchets, touchant principalement le milieu naturel, essaie de trouver des nouvelles techniques de stockage pour réduire l'impact des déchets. Le défi étant de pouvoir réduire la toxicité des déchets de manière à ce qu'ils ne soient plus considérés comme polluants pour la faune et la flore. Une des idées développées pour répondre à cette demande est la mise en place d'une gestion en mode bioréacteur des installations de stockage de déchets ménagers non dangereux. Ces ouvrages utilisent la réinjection de lixiviat pour augmenter la dégradation du déchet et ainsi produire plus de biogaz pour le valoriser. Une approche par modélisation et par mesure géophysique est utilisée pour comprendre la circulation des lixiviats dans ce milieu considéré comme une matrice poreuse. Des études sur sites industriels et en laboratoire ont permis de mettre en évidence l'aptitude des méthodes électriques pour étudier cette problématique. La problématique majeure est le suivi des variations de teneur en eau dans un milieu triphasique : solide (déchets), liquide (lixiviat) et gazeux (biogaz).

Pour cela, une approche en laboratoire est proposée pour analyser différentes conditions regroupant des saturations et désaturations associées à des augmentations de pression de gaz dans une colonne de déchets. Selon les méthodes d'analyse, les résultats de ces tests sont rendus sous forme de graphique proposant des interprétations.

L'aboutissant de cette étude montre la complexité technique à mettre en place de telles mesures liées à des variations de teneur en eau, de tassement du déchet, et à interpréter les mesures de résistivités apparentes à l'aide des outils d'inversion, les mesures déviantes, ainsi que toutes les autres incertitudes liées aux conditions opératoires. Cependant des observations ont pu être faites.

Mots-clé : Résistivité électrique, teneur en eau, pression, déchet, lixiviat, modélisation géophysique

# Abstract

---

Protecting our environment is a major issue that we are constantly trying to improve. The area of waste management is trying to find new storage techniques to reduce the impact of waste. The challenge is to being able to reduce the toxicity of waste, that they are no longer considered pollutants to wildlife. One of the ideas developed to reach this goal is the establishment of management bioreactor storage facilities for non-hazardous household waste mode. These works use the reinjection of leachate to increase the degradation of the waste and produce more biogas for value. A modeling approach and geophysical measurement are used to understand the leachate flow into the environment considered as a porous medium. Studies on industrial sites and at laboratory scale led to highlight the ability of electrical methods to study this problem. The major problem is the monitoring of changes in water content in a three-phase medium: liquid (leachate), solid (waste) and gas (biogas).

For this, a measurement protocol in the laboratory is proposed to analyze various conditions involving the saturation and desaturation associated with increases in gas pressure in a column of waste. According to the methods of analysis, the results of these tests are rendered graphically offering interpretations.

The ending of this study shows the technical complexity to implement such measures related to changes in water content, compaction of waste, and to interpret the apparent resistivity measurements using the inversion tools, deviant actions and all other uncertainties related to the operating conditions. However observations have been made.

Keywords: Electrical resistivity, moisture, pressure, waste, leachate, geophysical modeling

# Remerciements

---

En premier lieu, je voudrais remercier Mr Didier Pont pour m'avoir accordé le droit de faire le stage au sein de l'unité HBAN.

Viens ensuite toute l'unité de recherche technologique Mesures Physiques pour les Milieux Poreux. Au sein de cette équipe je remercie mon Roommate George Guyot qui m'a subit et supporté dans son bureau durant tout mon stage, enfin presque, vu que moi j'étais au frais durant l'été. Il a toujours été là dès que j'avais un souci technique ou un besoin d'aide pour une manipulation et je l'en remercie grandement. Son caractère et sa bonne humeur m'ont permis de bien rire.

Je remercie mon voisin de bureau Roger Martin pour son aide sur tous les soucis informatiques ainsi que ses aides de réflexions sur les traitements de certaines données. Mais aussi bien sûr, sur nos grandes discussions informatiques et les tests (hors stage) que nous avons effectués sur les nouveaux ordinateurs qu'il recevait.

Je remercie aussi le trio Antoine Cucinella (dit tony), Bernard Loiseau et Michel Anis. C'est grâce à eux que toutes les manipulations ont pu être mise en place, entre les câblages électronique de Michel, la gestion des logiciels et sonde par Bernard et la manutention de Tony, tout s'est déroulé pour le mieux. Sans eux mon stage n'aurait pu se faire. Merci à vous.

Je remercie aussi deux autres personnes du groupe MP2, Rémi Clément et Julien Grossin-Debattista qui m'ont apporté toutes leurs connaissances nécessaires au déroulement de mon stage, sur les bactéries, les déchets et les inversions. Merci à eux.

Et bien sûr je remercie mon maitre de stage Sylvain Moreau. Bien que souvent accaparé par son rôle de chef il était toujours là, dans un coin, pour veiller à ce que je n'ai aucun souci, toujours là pour répondre à mes questions ou m'aider des que j'étais coincé. Toujours favorable à toutes mes demandes d'expérience sur la colonne j'ai pu évoluer de manière autonome, sans bride et sans souci. Merci beaucoup à toi, je n'aurais pu rêver mieux comme encadrant de stage.

Outre les personnes de notre unité je veux remercier de manière générale toutes les personnes de HBAN qui m'ont aidé, ou avec qui j'ai discuté et qui m'ont permis de m'intégrer dans ce laboratoire de recherche. Merci à eux.

# Sommaire

---

I/ Présentation de Irstea*	10
1/L'institut de recherche Irstea	10
a- <i>L'Irstea</i>	10
b- <i>Ses compétences</i>	10
c- <i>Ses produits</i>	11
2/La direction régional d'Antony	12
a- <i>L'unité de recherche HBAN</i>	12
b- <i>L'équipe MP2</i>	12
II/introduction : Cadre et contexte	14
III/ Notions	16
1/ La tomographie électrique	16
a- La résistivité électrique	16
Définition	16
Paramètres d'influence	17
La loi d'Archie	17
Résistivité électrique et déchet	18
b- Tomographie de résistivité électrique (ERT)	18
Principe général	18
La résistivité apparente	18
La qualité des mesures	19
Sensibilité	19
Inversion	19
2/La dégradation des déchets	20
a- Les différentes phases de la biodégradation	21
b- Les paramètres d'influence de la biodégradation	23
La température	23
Le pH	23
La concentration en AGV	23
III/Description des équipements :	24
1/ Le dispositif de laboratoire et de mesure électrique	24
a- La colonne de test	24
b- Dispositif de mesure : Electrique	25
2/ Dispositif de comptage pour les liquides et les gaz	26
a- L'équipement d'injection de lixiviat	26
b- La collecte du biogaz	27
3/ Dispositif de mesure de température par fibre optique	27
IV / Etude In situ : Modélisation	30
1/ Les quadripôles et les positions des électrodes	30
2/ Logiciels de modélisation	30
3/ Coefficient géométrique pour une électrode réelle et un point équivalent	31
Détermination du coefficient géométrique pour l'électrode complète par simulation et par expérience	31
Le coefficient géométrique pour le point équivalent	32
4/ Les tests effectués et les paramètres d'inversion	34
5/ Performance de l'outil : lambda et maillage	34

a-	L'effet lambda :	34
b-	Le maillage	36
c-	Les Paramètres d'inversion :	38
d-	Validation des paramètres sélectionnés à l'aide d'une sphère se déplaçant dans le milieu:	38
V/	Etude de laboratoire :	40
1/	Matériel :	40
2/	protocole d'essai :	41
a-	Le protocole :	41
b-	Les essais	42
3/	Teneur en eau :	43
a-	La teneur en eau initiale	43
b-	Teneur en eau par tranche	44
c-	Teneur en eau dans la colonne	45
4/	Mesures et inversion :	46
a-	Mesures SYSCAL :	46
b-	L'inversion :	47
5/	Le jeu de Données	48
Extraction du bruit de l'Inversion		48
VI/	Résultats et discussion	49
1/	Résultats	49
a-	Analyse	50
La première analyse : L'analyse brute		50
La seconde analyse : LES CUBES		51
La Troisième analyse : LES TRANCHES		54
3/	Autre résultats	57
a-	Gaz	57
b-	Lixiviats	58
c-	Pression	59
d-	Température	59
e-	Niveau d'eau dans le fond de la colonne	60
f-	Résumé	60
VII/	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	60
ANNEXES		63
D'un point de vue critique		81
1/	L'aspect technique	81
2/	L'étude des résultats	83

# Table des Références

---

Figure 1: Les 9 centres d'Irstea.....	11
Figure 2: Répartition des activités au centre d'Antony.....	12
Figure 3: Schéma d'un bioréacteur.....	14
Figure 4: Inversion de résistivité et présence potentielle de biogaz.....	15
Figure 5: Sensibilité de la colonne: à gauche vu d'extérieur et à droite une coupe YZ en passant par le centre de la cellule.....	19
Figure 6: schéma d'inversion.....	20
Figure 7: Les différentes étapes de la dégradation biologique des déchets (Tiré du rapport de Vassilia VIGNERON et d'après Christensen et Kjeldsen, 1989).....	21
Figure 8: schéma de la colonne avec ses instruments.....	24
Figure 9: Le dispositif mécanique de la colonne.....	26
Figure 10: Type de spectre de diffusion dans la silice.....	28
Figure 11: Exemple de correction, A correction de la pente et B correction d'offset.....	29
Figure 12: Electrode et point équivalent.....	33
Figure 13: Modélisation de l'inversion BERT pour le palier 1.2 et au lambda 45.....	36
Figure 14: Comparaison de l'effet de la taille maximum de tétraèdre sur la définition d'une sphère, A=0.0001m <sup>3</sup> et B=0.001m <sup>2</sup> .....	37
Figure 15: Exemple de maillage, A vitesse de croissance de 1.5 et B 1.2.....	37
Figure 16: Représentation des sphères modélisées et inversées dans la colonne (la colonne n'est pas représentée).....	39
Figure 17: Validation du niveau d'eau dans la cellule modélisée à 0.3m.....	39
Figure 18: Les différents états des mesures Syscal.....	42
Figure 19: Inversion sans le bruit.....	48
Figure 20: Coupe YZ des inversions sous BERT.....	49
Figure 21: Tranche de résistivité dans la colonne.....	79
Figure 22: Lignes de courant dans la colonne.....	79
Figure 23: Génération des 218 premiers points qui serviront pour la mise en place du maillage.....	80
Graphique 1: Etape de la dégradation anaérobie des déchets (Pohland et Al-Yousfi, 1994).....	22
Graphique 2: pourcentage d'erreur entre les mesures réelles (dans de l'eau) et les mesures modélisées en électrode complète.....	32
Graphique 3: Pourcentage d'erreur entre le point équivalent à 0,0235 et l'électrode complète.....	33
Graphique 4: Variation des valeurs de résistivité suivant l'axe central z.....	35
Graphique 5: Variations de résistivité par tranche de 15cm.....	35
Graphique 6: Représentation graphique de l'évolution de la résistivité dans un cube élémentaire de 60cm <sup>3</sup> pour la partie basse de la colonne (0.43 à 0.63).....	51
Graphique 7: Représentation graphique de l'évolution de la résistivité dans un cube élémentaire de 60cm <sup>3</sup> pour la partie haute de la colonne.....	52
Graphique 8: Evolution des moyennes des résistivités par tranche de 30cm en fonction des mesures.....	54
Graphique 9: Comparaison entre état saturées et sec.....	56

Graphique 10: Comparaison de l'état sec et des capacités au champ.....	57
Tableau 1: Paramètre d'injection du Syscal .....	25
Tableau 2: Correspondance des longueurs de Fibre optique .....	29
Tableau 3: Paramètre d'inversion .....	38
Tableau 4 : Proportion de chaque type de déchet.....	40
Tableau 5: Teneur en eau du déchet.....	43
Tableau 6: Proportions massiques .....	43
Tableau 7: Masse et Teneur en eau des couches de déchets .....	44
Tableau 8:Récapitulatif des toutes les informations liées aux mesures .....	45
Tableau 9: Récapitulatif des mesures SYSCAL.....	46
Tableau 10: Comparaison Sec-saturation-capacité au champ.....	50
Tableau 11: valeur de résistivité des Cubes .....	52
Tableau 12: Valeur de résistivité (en $\Omega m$ ) par tranche et par état de la colonne.....	55
Tableau 13: Composition des prélèvements de gaz en %.....	58
Tableau 14: Conductivité, température et pH du lixiviat .....	58
Tableau 15:Paramètre F3D_Lab .....	78
Photo 1: Colonne d'essai .....	24
Photo 2: Syscal pro et batterie externe.....	25
Photo 3: Dispositif de mise en charge .....	26
Photo 4 : Auget pour gaz (non connecté) .....	27
Photo 5 : Enroulement du câble optique dans la colonne .....	29
Photo 6: Broyage du déchet .....	40
Photo 7: sonde de pression.....	82
Photo 8: pose de la fibre optique .....	83

# I/ Présentation de Irstea\*

---

\* Partie tirée des rapports de Nolwenn GUYOMAR et Marine AUDEBERT.

## 1/L'institut de recherche Irstea

### *a- L'Irstea*

Créé en 1981, le Cemagref, devenu Irstea en 2012 (**Institut national de recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture**), est un Etablissement Public à caractère Scientifique et Technologique sous la double tutelle des Ministères de la Recherche et de l'Agriculture. Les recherches d'Irstea contribuent au développement durable des territoires : elles aident à protéger et gérer les hydrosystèmes et les milieux terrestres, à dynamiser les activités qui les valorisent et à prévenir les risques qui leurs sont associés.

Ses cinq orientations scientifiques concernent :

- Les risques environnementaux tels que les crues, les inondations, les avalanches, les feux de forêt et les pollutions diffuses
- La surveillance des milieux aquatiques continentaux, les ressources en eau
- Les technologies propres telles que les écotechnologies, l'éco-évaluation, l'écotoxicologie, **le traitement et la valorisation énergétique des déchets organiques**
- L'aménagement du territoire
- L'économie et la sociologie de l'environnement : observation de la biodiversité, télédétection

Ces cinq orientations de recherche sont traitées par les 3 départements de recherche d'Irstea : Eaux de surface, Territoires et **Ecotechnologies**.

### *b- Ses compétences*

L'Irstea est un institut de recherche à taille humaine. Il est constitué de 25 Unités de Recherche (UR) réparties sur 9 centres couvrant l'ensemble du territoire français.

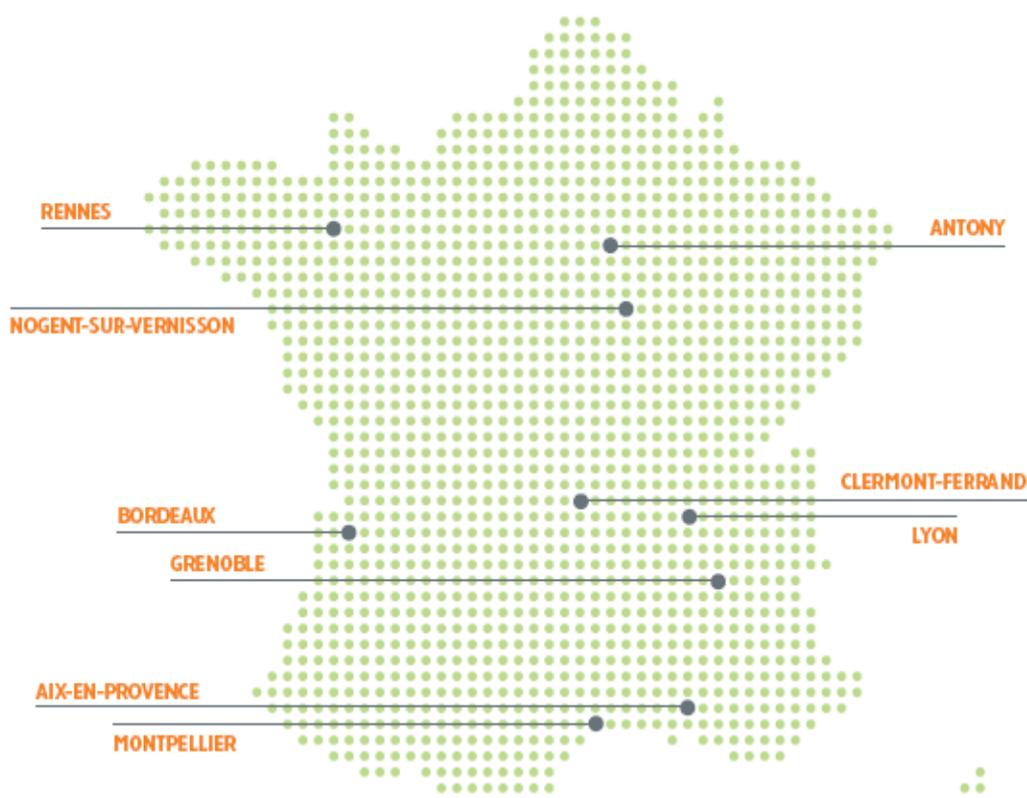


Figure 1: Les 9 centres d'Irstea

Parmi les 1650 employés, 600 sont des ingénieurs et des chercheurs. De plus, il accueille en moyenne, chaque année, plus de 251 doctorants, 40 post-doctorants et chercheurs étrangers, ainsi qu'environ 250 stagiaires de niveau Master. Leur formation est principalement axée sur les sciences de l'ingénieur, mais Irstea emploie aussi des personnes spécialisées dans les sciences de la nature et du vivant, dans les sciences de l'univers ou encore en sciences humaines et sociales. Cette diversité facilite la construction de partenariats interdisciplinaires.

### c- Ses produits

Différents produits résultent des recherches et des activités conduites à Irstea:

- 1417 publications en 2010,
- 620 participations par an à des colloques,
- 1250 essais dans des laboratoires accrédités,
- 47 brevets, 22 marques déposées au portefeuille industriel,
- 22 logiciels professionnels commercialisés,
- 5000 heures de cours, formation initiale et continue : 10 % du temps par an des Ingénieurs et des chercheurs dans plus de 50 universités et écoles
- Un incubateur d'entreprise, Minéa à Montpellier : création de deux entreprises par an.

Cette répartition illustre bien l'aspect Recherche appliquée à l'Industrie et Aménagement du territoire.

Pour ces productions, adaptées aux utilisateurs auxquels elles sont destinées, Irstea a mis en place une démarche qualité, aujourd'hui acquise pour les essais et les analyses en cours pour les activités de recherche.

## 2/La direction régional d'Antony

Le centre d'Antony apporte ses compétences dans les domaines des eaux continentales et des eaux usées (HBAN), du génie des procédés frigorifiques (GPAN) et des performances des **agroéquipements (TSAN)**.

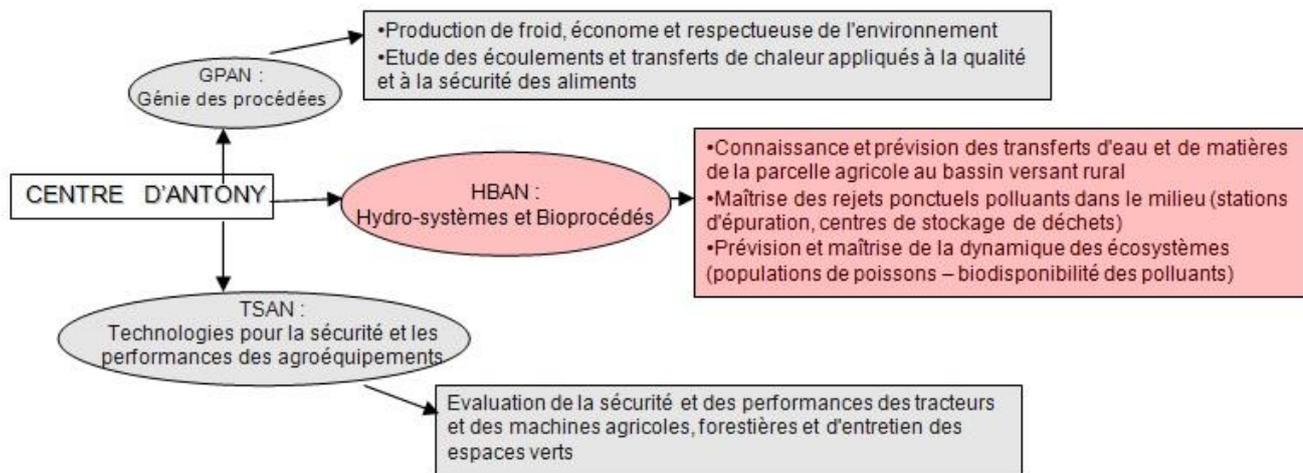


Figure 2: Répartition des activités au centre d'Antony

### a- L'unité de recherche HBAN

Les travaux de recherche de l'unité HBAN "Hydrosystèmes et Bioprocédés" sont appliqués à des domaines à forts enjeux environnementaux, par exemple :

- Etude du fonctionnement hydrologique des bassins versants agricoles aménagés
- Recherche sur les écosystèmes fluviaux naturels ou anthropisés, et en particulier, sur les peuplements piscicoles et la biodisponibilité des micropolluants
- Investigation sur les processus de dégradation et de transformation des eaux usées en stations d'épuration ou des eaux naturelles
- Compréhension des enjeux des transferts d'eau et de lixiviat dans les installations de stockage de déchets ménagers, ainsi que l'influence de ces transferts sur l'évolution des déchets et de la gestion du risque environnemental associé

### b- L'équipe MP2

L'équipe Mesures Physiques pour les Milieux Poreux (MP2), au sein de laquelle je réalise mon stage élève ingénieur, apporte un soutien méthodologique aux activités d'essais

menées dans l'unité et développe des outils de recherche et techniques de mesure pour la compréhension des propriétés hydro-physicochimiques des milieux poreux, tel que le déchet ménager par exemple. Quatre types d'activités la caractérisent aujourd'hui :

- La recherche en instrumentation et métrologie de la teneur en eau pour les sols et les déchets, essentiellement dans le cadre des thèmes de recherche SOWASTE (traitement biologique et stockage des déchets solides, performances technico-économiques et environnementales des filières) et TAPAHS (transferts d'eau et de polluants au sein des bassins ruraux aménagés)
- Le développement de la démarche métrologique en général, en lien avec l'ensemble des équipes de l'unité de recherche
- La coordination du réseau Mesure Irstea, constitué en ateliers thématiques sur des questions liées à la mesure
- Le service instrumentation pour l'aide à la conception et la mise en œuvre des projets des équipes de recherche

Les travaux menés par l'équipe MP2 au sein des Installations de Stockage des Déchets Non Dangereux (ISDND) s'appliquent notamment aux installations de type bioréacteur<sup>1</sup> (*figure3*). L'objectif de ces dispositifs est d'accélérer la dégradation de la masse de déchets (ce qui revient à minimiser le temps de stabilisation des déchets) avec comme souci premier d'éviter un impact négatif sur l'environnement.

En plus des enjeux écologiques, la problématique de la gestion des déchets ménagers répond aussi à d'importants enjeux économiques. En effet, accélérer la dégradation permet aux exploitants de décharges (Suez Environnement, Veolia, ...) de réduire les coûts induits par le suivi et la surveillance du site. C'est pourquoi Suez-Environnement est un des partenaires importants de Irstea dans le cadre du thème de recherche SOWASTE et finance certains projets.

---

<sup>3</sup>Le bioréacteur est un centre de stockage de déchets visant à accélérer la stabilisation du massif en favorisant la biodégradation par la recirculation des lixiviats

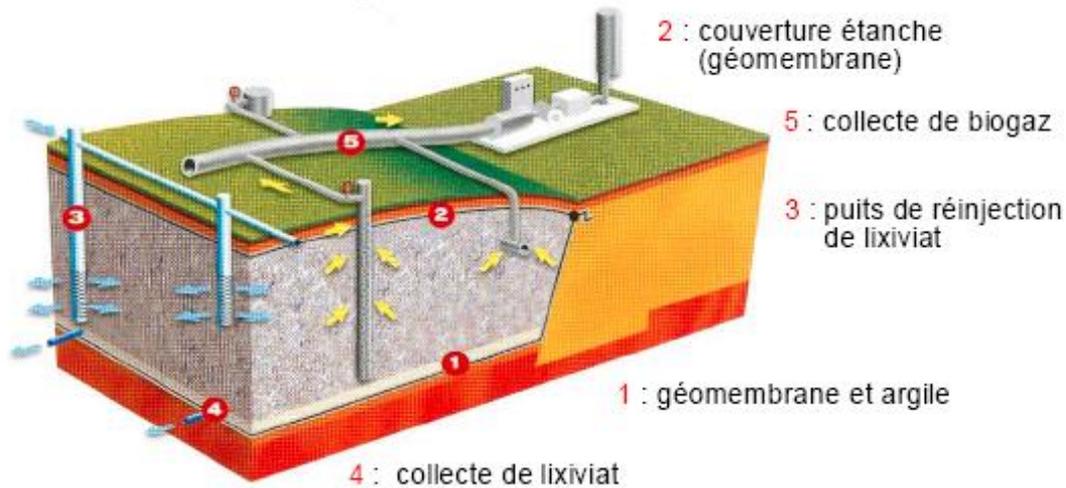


Figure 3:Schéma d'un bioréacteur

## II/introduction : Cadre et contexte

L'évolution des systèmes de consommation génère aujourd'hui une augmentation de la production de déchets (industriels, ménagés et dangereux). En 2009, la production de déchets en France était de 377 millions de tonnes. Cette production est de 10 millions de tonnes supérieurs aux valeurs de 2008.

La gestion de ces déchets représente un enjeu majeur pour l'environnement, la préservation des ressources et sur l'impact sanitaire. La mise en place de centres de stockage de déchets ultimes (C.S.D.U.) permet une régulation de cet afflux qui génère cet enjeu. Les déchets sont classés en trois grandes catégories, les déchets inertes, les déchets non-dangereux et les déchets dangereux. Les déchets inertes ne représentent pas un souci pour l'environnement et les déchets dangereux, eux, subissent un circuit de traitement spécifique afin de les ramener à un état non toxique. Quant aux déchets non-dangereux, ils sont stockés dans des I.S.D.N.D, des Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux. Ces structures récupèrent les déchets provenant de l'activité domestique des ménages, soit les Ordures Ménagères (O.M.) et les déchets industriels banals (D.I.B.).

L'inconvénient de ces ouvrages est le retour à un état inerte des déchets, c'est-à-dire à une condition qui ne présente plus aucun danger pour l'homme et son environnement. Pour ce faire, des techniques d'amélioration de gestion ont été mises en place, telles que les décharges en bioréacteur. Ce type de décharges fonctionne sur l'augmentation de la vitesse de biodégradation des déchets par les bactéries. Ces ouvrages sont dits en bioréacteur car la dégradation par bactérie produit une grande quantité de biogaz et notamment de Méthane valorisable. Ceci fait de ces décharges une évolution majeure de la gestion des déchets, par diminution du temps de retour à un état inerte et production de gaz valorisable pour la production d'énergie ou de chaleur.

Les principaux acteurs de cette technique sont donc les bactéries. Pour subsister et avoir le meilleur rendement, elles ont besoin d'un milieu chaud et humide. C'est sur ces points que les exploitants des

décharges se sont donc focalisés. Cependant, seule l'humidité est maîtrisable, la température étant un paramètre impossible à réguler à une échelle aussi grande. Pour modifier l'humidité d'une alvéole ; subdivision d'un casier qui définit une parcelle de la zone exploitable pour le stockage de déchet ; du lixiviat est réinjecté.

Les casiers de déchets sont des zones hermétiquement fermées après leur remplissage complet, c'est à ce moment-là que le lixiviat est réinjecté. Le lixiviat est le liquide de percolation qui transite à travers les déchets, il s'agit principalement d'eau de pluie qui s'est infiltrée avant la fermeture du casier. La recirculation de lixiviat dans le massif de déchets doit être dimensionnée pour être la plus efficace possible, il faut donc pouvoir la contrôler grâce à des outils de mesure.

Il existe plusieurs techniques ou méthodes pour disposer de ce type d'informations, mais elles sont généralement ponctuelles, comme par exemple les mesures de teneur en eau par méthodes TDR (time Domain Reflectometry) ou TDT (Time Domain Transmittivity). Des techniques plus spatialisantes sont donc utilisées : les techniques géophysiques. Ce sont des méthodes de mesure indirecte et non destructrice, la gravimétrie, la sismologie, le radar géologique ou la résistivité apparente.

La méthode la plus utilisée est la Tomographie de Résistivité Electrique, dénommée E.R.T. (Electrical Resistivity Tomography). Il s'agit d'une technique de prospection rapide à mettre en place, avec une possibilité de suivi temporel dont l'acquisition peut être optimisée.

L'idée est d'observer les variations de résistivité du milieu lors de réinjections de lixiviats pour déterminer les zones humidifiées. De telles modifications induisent des migrations de biogaz dont les effets sont très controversés sur les mesures de résistivité électrique.

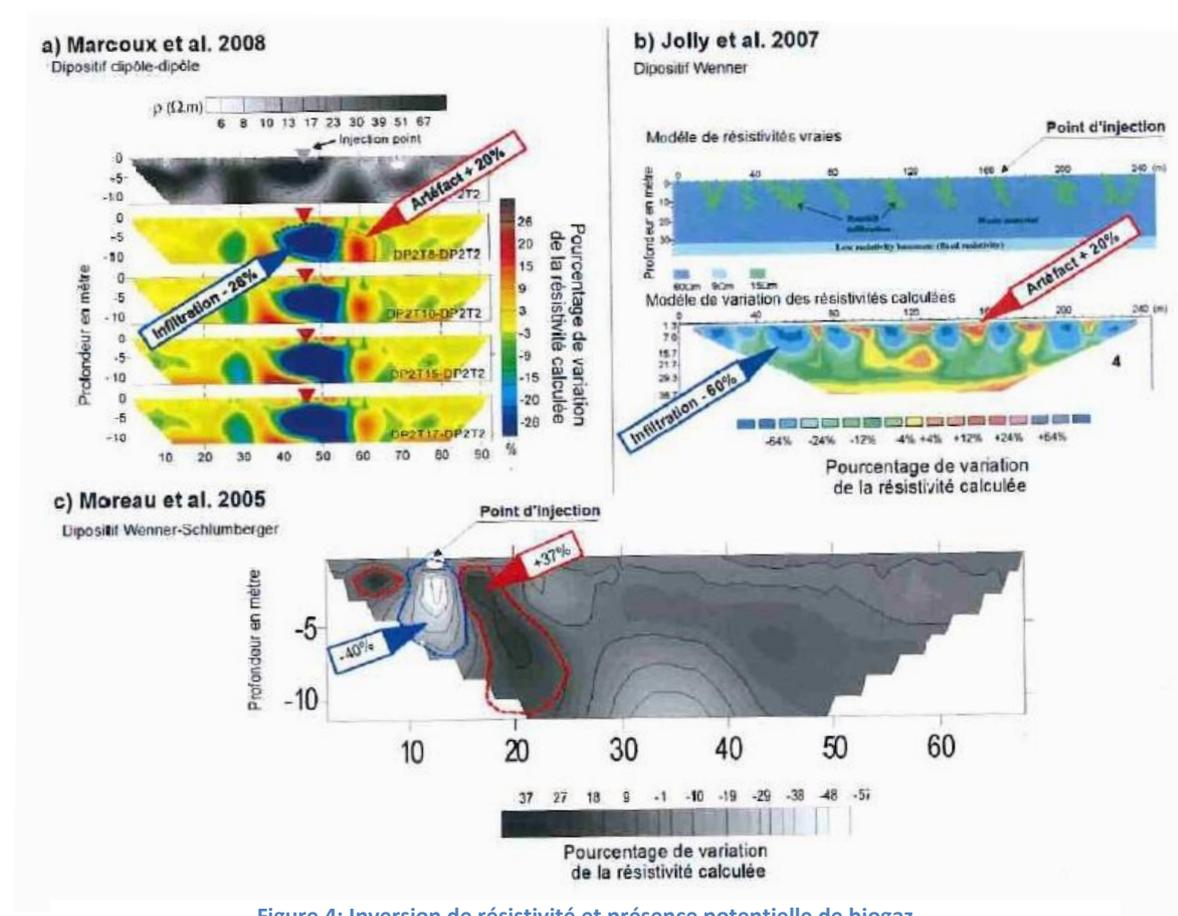


Figure 4: Inversion de résistivité et présence potentielle de biogaz

La figure 4 représente l'objectif de mon travail. Ces coupes représentent des données de résistivité électrique de terrain enregistrées sur différentes installations de stockage de déchets non dangereux. Sur ces résultats, on peut voir la présence, comme noté, de variation positive de la résistivité électrique. Il faut savoir que lors d'injection de lixiviat, la résistivité du milieu impacté décroît fortement. Il est apparu durant ces injections des zones d'augmentation de la résistivité autour des zones de diffusion du lixiviat. Plusieurs explications ont été proposées, et notamment un artefact du logiciel d'inversion ou une accumulation de biogaz. Déterminer l'impact de l'accumulation de biogaz sur les mesures de résistivité électrique a donc été objectif pour renforcer la pertinence des interprétations des données enregistrées in situ.

En laboratoire, il est possible de contrôler les écoulements de lixiviat dans une colonne de déchets. Des mesures de tomographie de résistivité électrique ont donc été menées pour essayer d'interpréter les résultats de la méthode selon des variations de teneur en lixiviat et de pression de biogaz. Cet objectif a été celui de mon stage et l'objet du présent rapport.

## III/ Notions

---

Ce thème de recherche entre dans le cadre d'une étude sur des déchets par méthode électrique, mais comment parler d'un sujet sans en connaître les bases. La partie qui suit contient les notions élémentaires sur les méthodes électriques, les principes et utilisations. Il est aussi utile de connaître l'évolution de la biodégradation d'un déchet ménager et assimilé pour mieux appréhender les résultats.

### 1/ La tomographie électrique

L'étude de la résistivité électrique des sols fait partie des méthodes de prospections géophysiques pour la caractérisation d'un milieu. Elle exploite les caractéristiques de la circulation électrique dans un milieu pour en récupérer une information exploitable sur des paramètres du sol. Tout matériau a une capacité plus ou moins forte à laisser passer le courant. Grâce à l'étude de la résistivité il est possible de remonter aux propriétés intrinsèques du matériau sans le prélever.

#### a- La résistivité électrique

##### Définition

La résistivité électrique est le paramètre qui mesure cette capacité à s'opposer au courant électrique. Elle est exprimée en ohmmètres ( $\Omega.m$ ). La circulation d'un courant électrique dans le sol est gouvernée par la loi d'ohm :

$$J = \sigma E ;$$

J, densité de courant, E, champ électrique et  $\sigma$  la conductivité électrique du milieu.

La quantité de courant injectée est connue (ampères), le champ électrique est mesurable par une différence de potentiel (volts), ce qui nous permet de connaître la conductivité électrique du milieu.

La résistivité électrique est l'inverse de cette conductivité :

$$\rho = \frac{1}{\sigma};$$

$\rho$ , résistivité électrique ( $\Omega.m$ ) et  $\sigma$ , conductivité électrique (S/m).

Ce sont les variations de résistivité qui permettent de déterminer la nature d'un sol et d'observer ses hétérogénéités. Elles font essentiellement appel au phénomène de la conductivité électrolytique, c'est-à-dire la migration d'ions, dans le cas des roches il s'agit de conductivité électronique. La résistivité varie énormément en fonction du matériel étudié, allant de 0,2  $\Omega.m$  pour l'eau de mer à 100 000  $\Omega.m$  pour un granite ou une résistance infini pour les hydrocarbures. Le lixiviat est quant à lui compris entre 1 et 2  $\Omega.m$ . Un déchet ménager, selon son état de saturation et de biodégradation, varie quant à lui entre 5 et 200  $\Omega.m$  environ.

### Paramètres d'influence

La circulation d'un courant électrique dans le sol et la résistance à ce passage dépendent de :

- la porosité du milieu ( $\Phi$ ),
- la teneur en eau ( $S$ ),
- la résistivité de l'eau ( $\rho_w$ ) et de la matrice,
- la température,
- la forme des grains (tortuosité).

Les roches sont des matériaux essentiellement résistants au passage du courant, c'est donc par le biais des fluides présents dans le sol que ce dernier transite. Les fluides contenus dans le sol sont présents dans les pores et/ou fractures du sol pour le cas des roches magmatiques. Ce n'est pas l'eau en elle-même qui transporte le courant mais les sels dissous qu'elle contient. C'est en cela que la teneur en eau, la conductivité de l'eau et la taille des pores jouent un rôle sur la mesure de résistivité électrique d'un milieu.

### La loi d'Archie

En 1942, Gustave Archie proposa une loi empirique, toujours utilisée aujourd'hui, pour relier la résistivité d'un fluide à celle d'un sol :

$$\rho = a\Phi^{-m} S^{-n} \rho_w ;$$

$n \approx 2, 0.5 < a < 2.5, 1.3 < m < 2.5$

Cette loi n'est applicable que pour les milieux sableux, schisteux, gréseux, ou pour les sols à grains moyens et grossiers. Le paramètre « a » est un facteur impliquant le type de contenant pour l'eau, pores ou fractures. Le facteur « n » fait intervenir la notion de tortuosité et est environ égal à 2 pour des saturations comprises entre 0.2 et 1. Et « m » est un facteur de cimentation (Il dépend de la forme des pores, de la compaction et varie entre 1,3 pour les sables non consolidés et 2,2 pour les calcaires cimentés).

## Résistivité électrique et déchet

Les déchets constituent un milieu complexe résistant au passage de courant électrique. Dans ce genre de milieu, la résistivité est principalement conduite par les lixiviats. Le déchet est un matériau vivant et il a été démontré par **[Moreau et al, 2011]** que la biodégradation du déchet influençait l'évolution de la résistivité électrique.

Comme pour les milieux rocheux, la résistivité dans un massif de déchet est donc dépendante de son compactage, de sa composition, de sa température, de sa teneur et composition en lixiviat. Le déchet est un milieu composite dont les valeurs de résistivité peuvent varier fortement. La biodégradation du déchet est exothermique et impacte aussi la résistivité **[Campbell et al, 1948]** ont démontré que la résistivité peut varier de 2% par degré Celsius.

### b- Tomographie de résistivité électrique (ERT)

#### Principe général

Le principe de cette méthode repose sur la mesure d'une différence de potentiel électrique créé par une source artificielle de courant continu. Le courant électrique est injecté dans le milieu par 2 électrodes (dites de « courant ») et la mesure du potentiel électrique par 2 autres électrodes (dites de « potentielle »).

Dans un milieu homogène le potentiel enregistré renvoie la résistivité « vraie » du sol, mais dans un milieu hétérogène il s'agit d'une résistivité apparente mesurée  $\rho_{app}$ .

La tomographie de résistivité électrique (E.R.T) est basée sur le principe de la mesure de résistivité en courant continu. Elles utilisent un grand nombre d'électrodes qui sont à tour de rôle, électrodes d'injection et de mesure, le tout est géré par un programme de mesure.

#### La résistivité apparente

La valeur de la résistivité apparente résulte de la contribution volumique de tout volume du milieu traversé par le courant injecté, le tout en fonction de la distance à l'injection. Elle est calculée en faisant le rapport entre le potentiel  $\Delta V$  (V) et le courant injecté  $I$  (A), multiplié par un facteur géométrique  $K$  (m) :

$$\rho_{app} = K \times \frac{\Delta V}{I} ; (\text{ohm.m})$$

Le facteur  $K$  est un paramètre qui dépend uniquement de la géométrie du dispositif de mesure utilisé, et donc de la disposition des quadripôles. Il peut être défini dans un espace de résistivité homogène par les équations de Neumann :

$$K = \frac{1}{2\pi} \times \left[ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] ;$$

Avec A et B les électrodes d'injection et M et N les électrodes de mesure.

Cette équation n'est valable que pour une surface plane. Avec une topographie,  $K$  ne peut être obtenu que numériquement.

## La qualité des mesures

Les mesures de résistivité dépendent de l'espacement entre les électrodes. Plus les électrodes sont espacées, plus la profondeur d'investigation est importante. Mais alors l'information enregistrée, la mesure de potentiel, sera faible et donc moins précise.

La question de la densité de points s'impose aussi. Plus on a de points de donnée plus la résolution de l'information est bonne. Un trop grand nombre de points de mesure surcharge le temps de prise de mesure mais aussi les calculs d'inversion.

## Sensibilité

La sensibilité est un paramètre complexe à aborder. Elle correspond à une zone où le plus de lignes de courant circulent. Cette sensibilité varie en fonction des dispositifs de mesure utilisés. Cette fonction permet de mettre en avant les zones pour lesquelles les mesures de potentiel seront influencées par la résistivité du milieu.

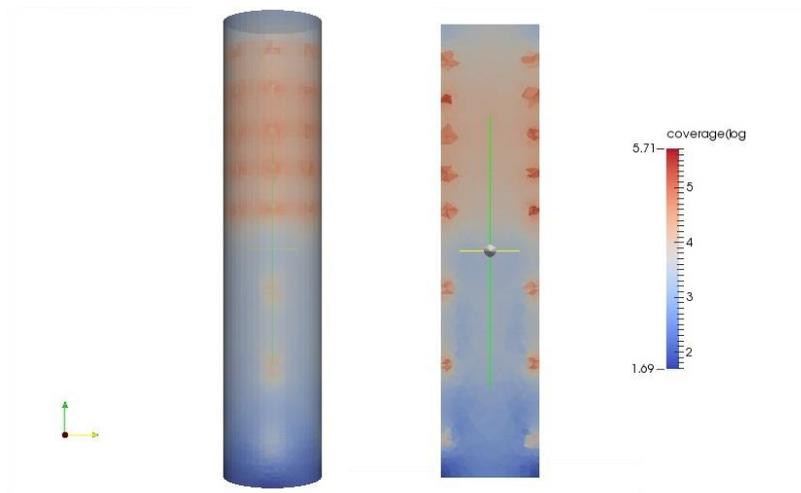


Figure 5: Sensibilité de la colonne: à gauche vu d'extérieur et à droite une coupe YZ en passant par le centre de la cellule.

Dans l'exemple de la figure 4, la partie haute à une meilleure sensibilité que la partie basse. Ceci est dû au fait que la partie haute est implantée avec plus d'électrodes, ce qui fait une meilleure résolution d'information et donc une meilleure couverture de sensibilité. Comme on pouvait s'y attendre, c'est autour des électrodes que la sensibilité est la plus élevée et c'est au centre de la colonne que les mesures de résistivité seront moins sensibles. Cependant les valeurs restent satisfaisantes (entre 1,69 et 5,71). La valeur limite d'acceptabilité est placée à 1. Toutes valeurs inférieures à 1 indiquent une mauvaise sensibilité, et plus la valeur est forte plus la qualité est satisfaisante.

## Inversion

Dans notre cas, pour prendre en compte la géométrie de notre cellule de mesure, l'inversion des données se fait à partir du logiciel BERT. Ce logiciel permet de passer des résistivités mesurées aux résistivités vraies. L'inversion nous donne un modèle géophysique numérique correspondant à la distribution de la résistivité dans l'espace étudié.

Le schéma de l'inversion correspond à la création d'un quadrillage dans la surface étudiée. Pour chaque point du quadrillage une valeur sera calculée. L'inversion crée un modèle initial de résistivité vrai, le transforme en résistivité apparente calculée et le compare avec les valeurs de terrain. Si la comparaison est trop différente, le logiciel recrée un nouveau modèle de résistivité. Le premier modèle créé par le logiciel est une moyenne de résistivité des mesures de résistivité apparente mesurée.

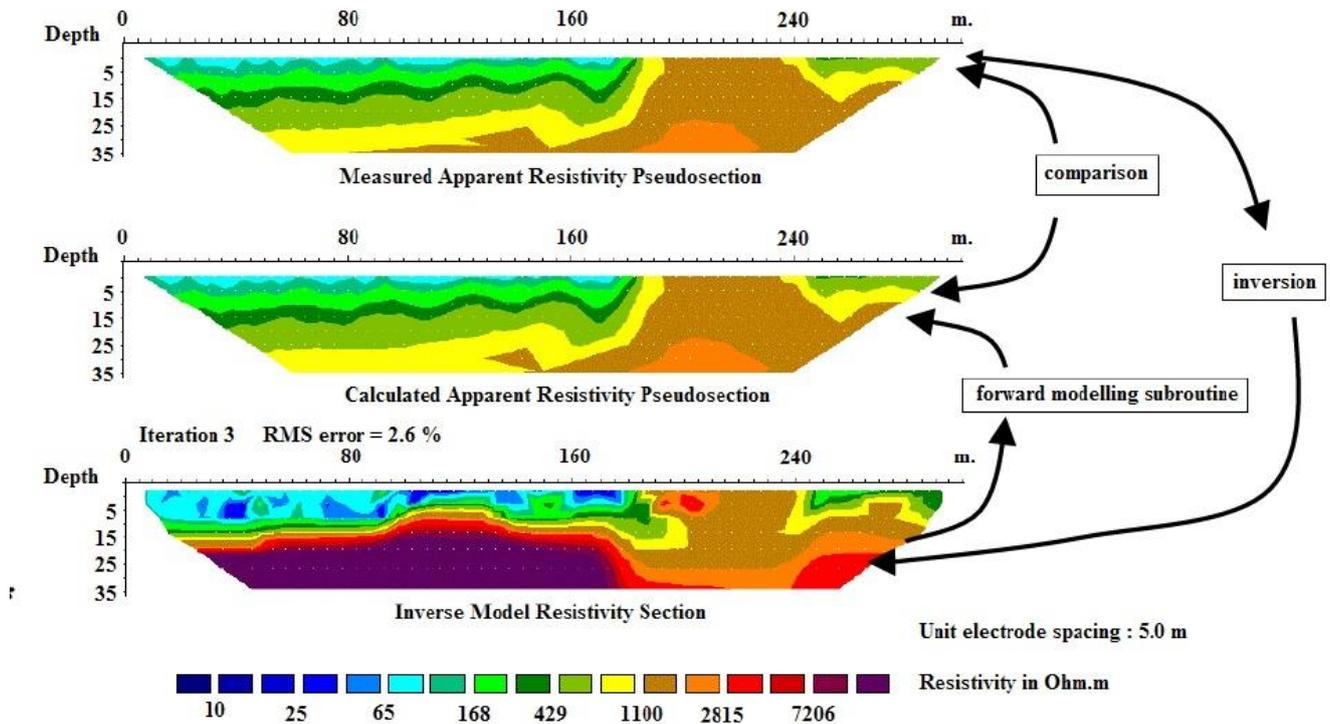


Figure 6: schéma d'inversion

Le modèle ajuste son inversion grâce au paramètre RMS (Root-Mean-Square), il cherche à minimiser l'erreur entre le modèle et les valeurs de terrain. Cependant il faut faire attention au modèle final, il existe toujours des équivalences, c'est-à-dire un modèle de résistivité apparente peu avoir deux, ou plusieurs, modèles de résistivité vraie.

A la fin d'une inversion, le logiciel renvoie des paramètres d'erreur, RMS et  $\chi^2$ . Le RMS donne la différence mathématique entre les deux modèles. Le  $\chi^2$  est très similaire au RMS mais normalisé par l'erreur propre de chaque quadripôle de mesure.

Généralement, pour conforter un modèle, on le conditionne par des données extérieures, telles la gamme de valeurs ou alors des données de terrain. Dans notre cas, aucune information ne permet ça à cause de l'hétérogénéité des déchets qui implique une très large variabilité des mesures de résistivité observées.

## 2/La dégradation des déchets

Le déchet est un milieu vivant, au fil du temps il évolue, il change, il se dégrade. Notre essai porte sur une période de test de trois mois environ. Même sur ce laps de temps, le déchet a le

temps de se modifier. Ce sont les bactéries/micro-organismes à l'intérieur du déchet qui en sont responsables. Elles seront plus ou moins actives en fonction de la température et de la présence d'eau.

### a- Les différentes phases de la biodégradation

Les bactéries sont des organismes vivants pluricellulaires présents en grand nombre dans le vivant. Ce sont des êtres qui ont un rôle important dans les cycles de biogéochimie. Elles sont responsables de la dégradation de la matière organique et transforment les composés organiques (glucides, protéines et lipides) en produit organique simple, une biodégradation complète peut amener le déchet à un état de composé inorganique ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_4^+$ ). Cet état est recherché dans les ouvrages de stockage pour réduire les risques pour l'environnement.

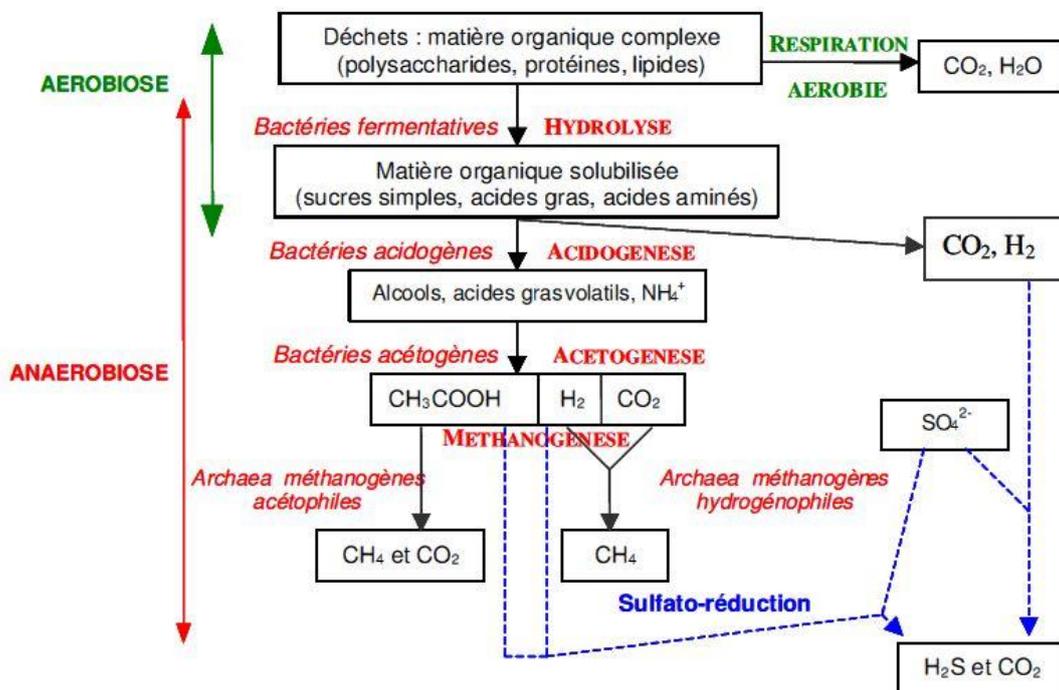


Figure 7: Les différentes étapes de la dégradation biologique des déchets (Tiré du rapport de Vassilia VIGNERON et d'après Christensen et Kjeldsen, 1989)

La dégradation organique se déroule en deux phases majeures : l'aérobie (Figure 3 ; en vert) et l'anaérobie (Figure 3, en rouge).

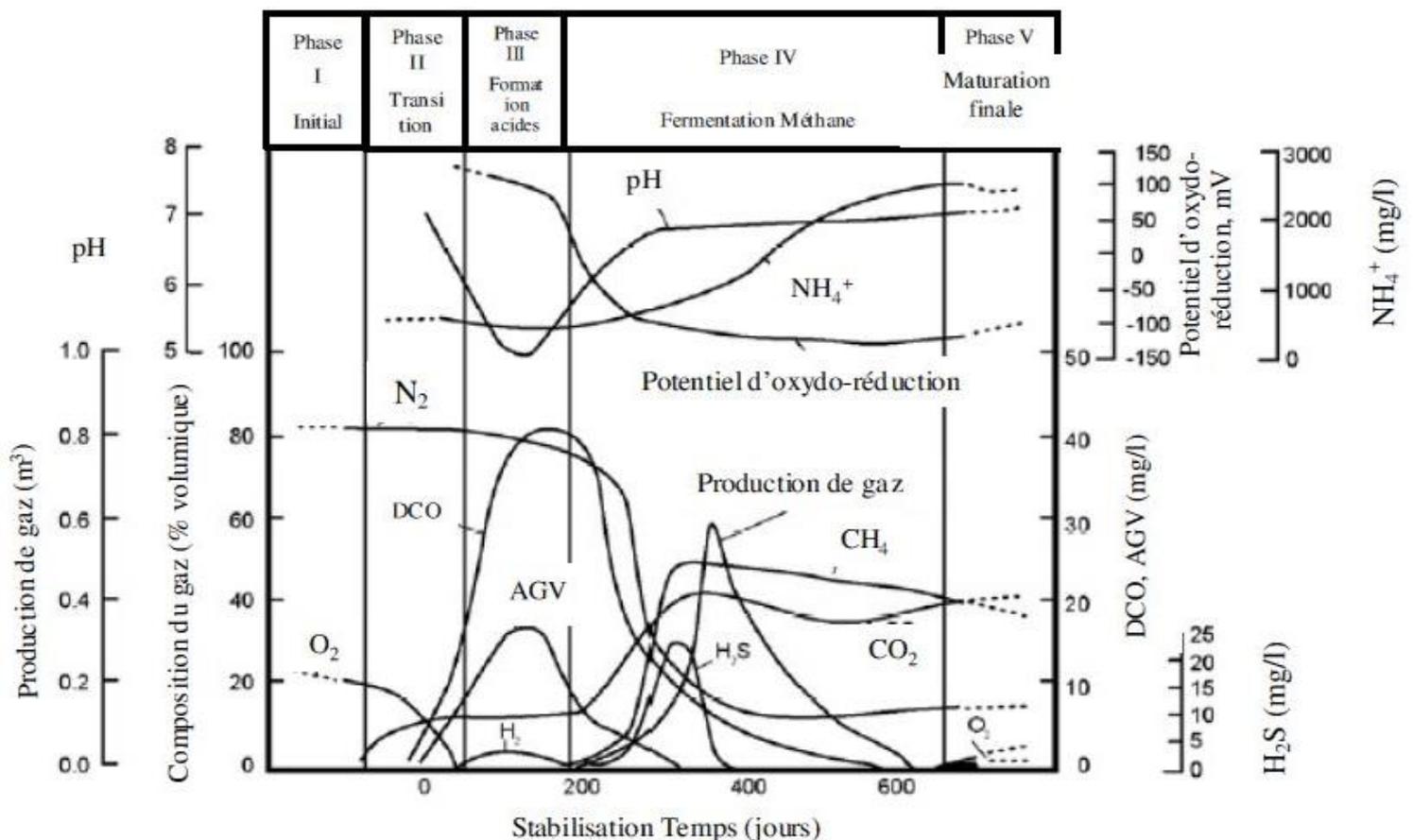
La digestion aérobie est la réaction la plus rapide et c'est elle qui consomme l'oxygène présent dans le milieu. Quand la dégradation se passe dans un milieu fermé, le milieu rentre dans un état anaérobie après avoir consommé tout l'oxygène.

Cette digestion se divise en 4 étapes : L'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse. Ces réactions dépendent de la présence ou non des composés nécessaires aux bactéries pour la dégradation et se déroulent généralement suivant cet ordre :

- L'**hydrolyse** est la dégradation des molécules complexes en molécules plus petites et plus simples. Ces molécules souvent insolubles sont ainsi réduites en fragments dissous. On trouve parmi ces composés insolubles les graisses, les glucides et les protides.

- Les molécules simples fraîchement produites sont consommées par les bactéries fermentaires lors de l'**acidogénèse**, la seconde étape. Les Monomères (éléments constitutifs des protéines, ce sont des acides aminés, des acides gras et des sucres) sont métabolisés pour produire des AGV (Acides Gras Volatils) tels que les acides acétique, valérique, lactique et formique ; et vont aussi produire de l'alcool, de l'hydrogène ( $H_2$ ) et du sulfure de dihydrogène ( $H_2S$ ). Les bactéries présentes dans cette étape ont une capacité de réplication importante et une accumulation de ces bactéries peut créer un déséquilibre qui inhiberait les réactions suivantes.
- Après l'acidogénèse vient l'étape de l'**acétogénèse**. Les composés produits lors de cette étape sont l'acétate, le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et l'hydrogène.
- La dernière étape est la **méthanogénèse**. C'est l'étape finale de la dégradation, elle transforme la matière organique en compost, méthane et  $CO_2$ . Cette phase est liée au pH, les bactéries impliquées dans la méthanogénèse sont très sensibles aux variations de pH. Un pH faible (acide) arrête la production de gaz. Un pH en-dessous de 6 stoppe la production. Alors qu'un pH inférieur à 5 anihile complètement les bactéries. L'acidité vient de la dégradation des acides produits lors des étapes précédentes et si le milieu n'a pas de pouvoir tampon cette acidification va augmenter à tel point que la méthanogénèse n'aura pas lieu.

Tout ce processus aboutit à une production de gaz qui est potentiellement valorisable et notamment celui produit par la méthanogénèse. La méthanogénèse est principalement représentée par la production de  $CH_4$  et de  $CO_2$ . La *Figure* suivante représente l'évolution du gaz mais aussi du pH et des principaux composés présents :



Graphique 1: Etape de la dégradation anaérobie des déchets (Pohland et Al-Yousfi, 1994)

Ce graphique reprend ce qui a été cité plus haut, on peut y voir les 4 étapes de la dégradation avec les courbes de production de gaz et de pH. On y remarque la disparition de l'oxygène à l'étape 1 (phase 2 sur le graphique) et l'apparition du CH<sub>4</sub> lors de la méthanogénèse. Il est important de noter la présence du diazote (N<sub>2</sub>), ce gaz ne peut être produit ailleurs que dans l'atmosphère ce qui en fait un marqueur de dilution. Dans une enceinte coupée de tout contact avec l'atmosphère, si y a une production de gaz, la concentration de N<sub>2</sub> va diminuer par dilution. Si la concentration en diazote augmente c'est que la cellule n'est pas étanche et en contact avec l'atmosphère.

## **b- Les paramètres d'influence de la biodégradation**

### **La température**

La température constitue un paramètre important, celui qui conditionne la vitesse des réactions enzymatiques. Les bactéries ont besoin d'une stabilité thermique pour éviter tout stress et donc diminuer la mortalité. Un apport thermique est donc utile pour optimiser la dégradation, de plus une augmentation de la température permet une augmentation de la croissance des méthanogènes (d'après Van Lier et al., 1997)

### **Le pH**

Le pH est un indicateur de l'état de la réaction de méthanogénèse, un pH stable indique un système équilibré et une réaction performante, cependant une diminution est problématique et synonyme d'un dysfonctionnement. La diminution peut être due à une forte production en AGV qui sature en acide le milieu. Si le milieu a une bonne capacité tampon une surproduction d'acide peut être inhibée.

La valeur idéale pour les bactéries se situe entre 6 et 8 d'après (Ehrig 1983) ou 6,8 et 7,4 d'après (Barlaz, Ham et al. 1990). Une forte variation de pH ou une valeur inférieure à 6,5 peut stopper la production de gaz voir même aboutir à une destruction des bactéries si la valeur est inférieure à 5.

### **La concentration en AGV**

Ce composé est responsable de l'inhibition des méthanogènes, une forte accumulation en acide gras volatile (AGV) aura tendance à diminuer le pH et donc stopper l'activité bactérienne.

Il est dit dans la littérature qu'un déséquilibre s'amorce pour une concentration en AVG supérieure à 2g/L (Chynoweth et al., 1998).

Si le milieu est mal saturé, les AGV ne se dilueront pas et vont avoir tendance à se concentrer et ainsi diminuer la valeur du pH. Parmi les AVG c'est la production de l'acide propionique qui est la plus toxique et une forte concentration en acide butyrique démontre une mauvaise dégradation de la matière.

# III/Description des équipements :

## 1/ Le dispositif de laboratoire et de mesure électrique

### a- La colonne de test

Le test de laboratoire s'effectue sur une colonne cylindrique de 1.8 mètre de hauteur et de 0.196 mètre de rayon. Cette colonne est composée de 2 sous-parties de 0.9m de haut, posée l'une sur l'autre.

La partie haute correspond à la colonne d'étude utilisée par Laura CHEVALIER en 2012 pour l'étude sur « le développement d'une approche couplée entre modélisation hydrodynamique et géophysique, dans le cadre d'une caractérisation des propriétés hydrodynamiques des massifs de déchets ». Elle est composée de 40 électrodes disposées suivant des anneaux séparés de 15 cm en hauteur (soit 5 anneaux). Sur ces 5 anneaux sont déposés 8 électrodes suivant un angle de 45°.



Photo 1: Colonne d'essai

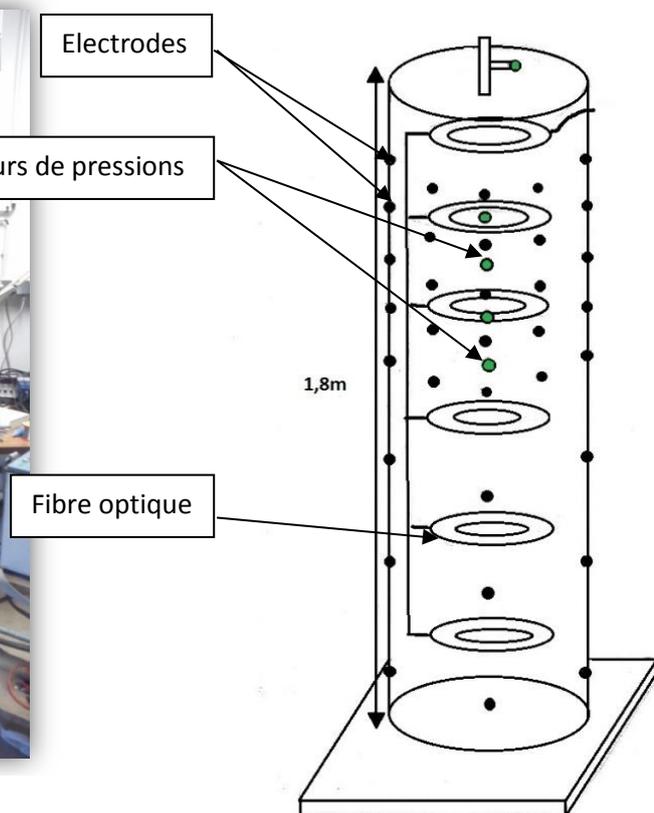


Figure 8: schéma de la colonne avec ses instruments

Quatre capteurs de pression sont placés en partie haute (entre 0,9 et 1,8 m). Ils sont distants de 15cm et sont positionnés entre les anneaux 1-2, 2-3, 3-4 et 4-5.

Sur la colonne sous-jacente seulement 12 électrodes sont disposées, sur 3 anneaux séparés de 30cm. Dans cette configuration les électrodes sont placées sur les anneaux avec un angle de 90°.

Enfin, un câble de fibre optique sera placé pour enregistrer les variations de température au sein de la colonne.

## b- Dispositif de mesure : Electrique



Photo 2: Syscal pro et batterie externe

La mesure ERT emploie un appareil de mesure nommé Syscal Pro de la société Iris-Instruments®. Il permet, d'injecter du courant dans un milieu et d'enregistrer une différence de potentiel.

Cet appareil est principalement utilisé dans les études d'investigation de résistivité pour la caractérisation des structures du sous-sol : pour l'environnement, le génie civil, les eaux souterraines, l'archéologie ou encore dans l'exploitation des mines.

Il est couplé à plusieurs logiciels tels qu'ELECTRE Pro qui permet de lui configurer les séquences d'injection, PROSYS II pour le transfert de données vers un PC ou encore COMSYS PRO, logiciel de contrôle du Syscal par PC.

L'appareil est composé d'un système de transmission allant jusqu'à 800V d'injection en mode manuel et à un maximum de 2.5A. Il a la capacité de convertir les 12V d'une batterie externe pour faire ses injections.

Le récepteur contient 10 canaux d'entrée pouvant supporter au maximum 15V, il enregistre le courant électrique, le voltage et la déviation standard. Le récepteur a une précision moyenne de l'ordre de 0.2% et une résolution de 1mV.

Les séquences sont programmées sur ordinateur puis chargées sur le Syscal. Les mesures se font de manière automatique et un fichier contenant les résistivités est enregistré.

Pour la prise de mesure le Syscal a été configuré suivant ces paramètres :

Tableau 1: Paramètre d'injection du Syscal

Paramètres	Valeur	Information
Stack min	1	Nombre de cycle minimum à réaliser
Stack max	3	Nombre de cycle maximum à réaliser
Q max	3 %	Facteur de qualité requis (déviat. standard V/I)
Time	250 ms	Durée d'impulsion
Vp requested	200 mV	Valeur de réception constante
Vab max	800 V	Valeur d'injection maximum

L'appareil a une grande gamme de possibilités en ce qui concerne l'injection, dans notre cas nous avons basé nos paramètres en fonction du temps de prise de mesure mais aussi des valeurs de mesure de potentiel électrique. Nous avons fait différents tests sur une colonne d'eau afin de prendre la meilleure configuration d'injection.

Les capteurs de pression au nombre de 4, sont placés sur une même verticale avec un espacement de 15 cm. Un 5<sup>ème</sup> capteur est placé au sommet de la colonne pour connaître la pression dans la partie au-dessus du déchet. La pression est suivie en temps réel sur ordinateur par un

logiciel de mesure. L'information de la pression est enregistrée en bar avec un pas de temps de 60 secondes. La pression est suivie depuis le moment où la colonne a été fermée.

## 2/ Dispositif de comptage pour les liquides et les gaz

La partie mécanique du dispositif correspond au système d'injection de l'eau mais aussi de récupération du lixiviat. La Figure 9 représente schématiquement ce dispositif :

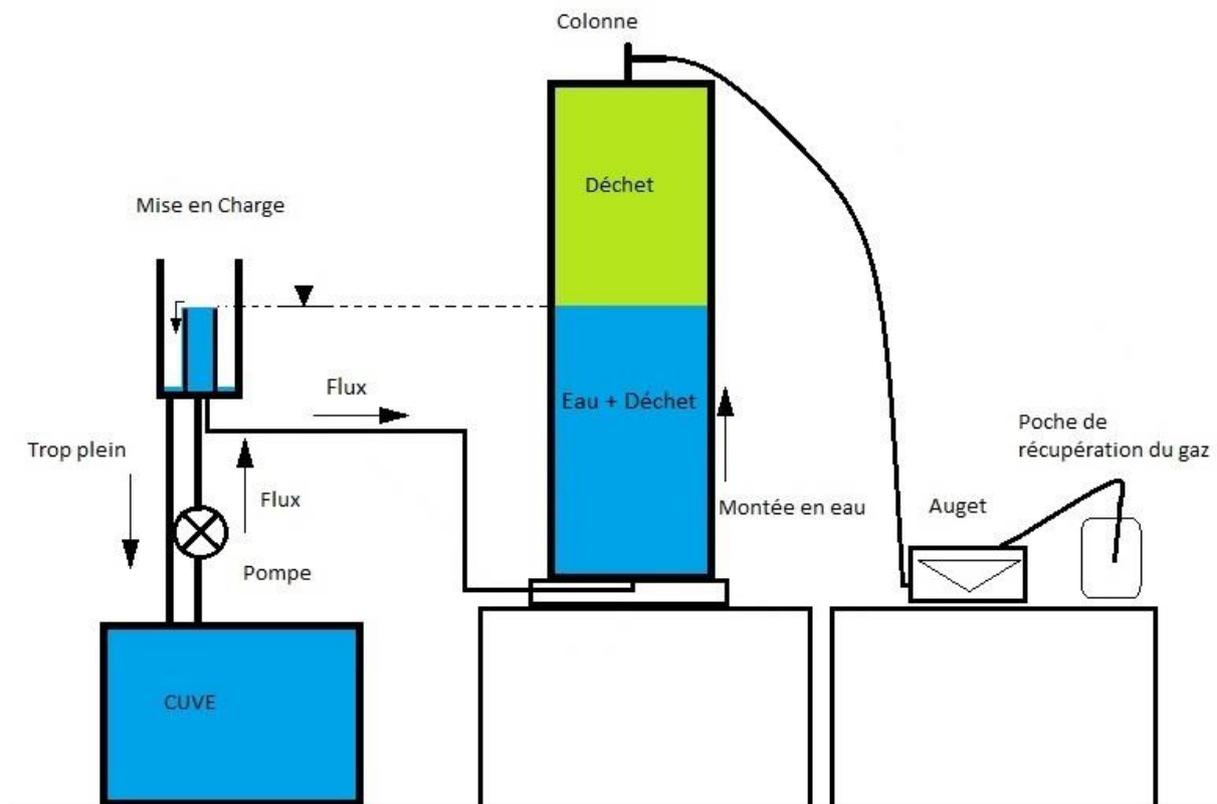


Figure 9:Le dispositif mécanique de la colonne



Photo 3: Dispositif de mise en charge

### a- L'équipement d'injection de lixiviat

Pour remplir la colonne de déchets nous avons choisi de la saturer en partant du bas. Une saturation par le bas permet une meilleure saturation des pores en chassant le gaz vers le haut de la colonne. Le problème d'une telle technique est la charge à appliquer pour faire monter le niveau d'eau. Plus la différence de charge entre le dispositif de remplissage et le niveau dans la colonne sera importante, plus la vitesse de circulation de l'eau sera élevée.

Pour pallier à ce problème nous avons utilisé la technique de la mise en charge comme dans les réseaux de circulation d'eau potable dans les villes (château d'eau ou bassin de mise en charge). La mise en

charge utilise la loi hydrostatique liant la pression et l'altitude :

$$\Delta P = \rho g \Delta h ;$$

Avec  $\Delta P$  la variation de pression (en Pa),  $\rho$  la masse volumique du fluide (en  $\text{Kg/m}^3$ ),  $g$  l'accélération de la pesanteur (environ  $9.81\text{m/s}^2$ ) et  $\Delta h$  la différence d'altitude.

Une masse d'eau située à une hauteur supérieure à celle d'une autre masse d'eau connectée à elle, appliquera une pression qui ramènera les deux niveaux d'eau à une hauteur d'équilibre, c'est le principe des vases communicant.

Notre dispositif (photo 3) contient une cuve au milieu servant de mise en charge. L'eau de la pompe arrive dans le dispositif de mise en charge et la partie centrale se remplit, c'est cette partie qui correspond au système de charge. Si la charge est plus élevée que dans la colonne le niveau va rester stable dedans et remplir la cellule. A contrario, si la pression dans la colonne est plus forte le niveau va augmenter dans la première cuve et se déverser dans la deuxième. Cette autre cuve permet de refouler l'eau dans la cuve d'injection d'eau pour ne pas perdre d'eau et toujours suivre les volumes d'eau injectés dans la colonne.

#### **b- La collecte du biogaz**

La récupération du biogaz est faite par des sacs Tedlar connectés au haut de la cellule. Le gaz transite préalablement par un système à auget qui permet de mesurer le volume de gaz collecté (photo 4), avant qu'il ne rentre dans la poche. Pour connaître le volume correspondant à un basculement une expérience de calibration a été faite. Une poche du même type a été remplie avec de l'air sur 40 basculements puis pesée. C'est par la technique de la poussée d'Archimède (masse du volume d'eau déplacé) que le volume en a été déduit, un basculement a été évalué à 75mL.



Photo 4 : Auget pour gaz (non connecté)

L'analyse du biogaz est réalisée par chromatographie en phase gazeuse, il utilise l'appareil de mesure Micro GC CP4900 QUAD, Varian. Il s'agit d'un appareil de mesure capable d'identifier la composition et la concentration des gaz qui sont produits par le déchet. Il comporte 3 colonnes de mesure capables d'analyser les substances suivantes :  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  et  $\text{N}_2$ .

### **3/ Dispositif de mesure de température par fibre optique**

Dans cette étude, le suivi de la température est fait par fibre optique. C'est une méthode dite de mesure de température distribuée par effet Raman, plus généralement appelé DTS (Distributed Temperature Sensor). Cette technique permet de suivre en continu la température tout le long d'un câble optique, ce qui accroît la couverture spatiale de la mesure.

Le principe est basé sur la réflectométrie optique temporelle. Une source laser envoie des impulsions de courte durée (quelques ns) dans la fibre optique où la silice réagit en absorbant et diffusant une partie de l'onde incidente. Le signal rétro-diffusé est capté et scruté par l'analyseur qui lui associe le temps d'aller-retour de l'onde lié à la distance à l'appareil.

Le spectre de diffusion (*Figure 4*) comprend plusieurs raies caractéristiques dont :

- la raie Rayleigh correspondant aux fluctuations de densité et de composition de la silice ; elle est utilisée dans les réflectomètres télécom pour vérifier l'intégrité des liaisons optiques,
- les raies Brillouin liées aux modes acousto-optiques, dépendant de la température et de la déformation de la fibre,
- les raies Raman liées aux vibrations moléculaires de la silice ; le rapport d'intensité des deux raies Stokes et anti-Stokes est directement lié à la température de la fibre.

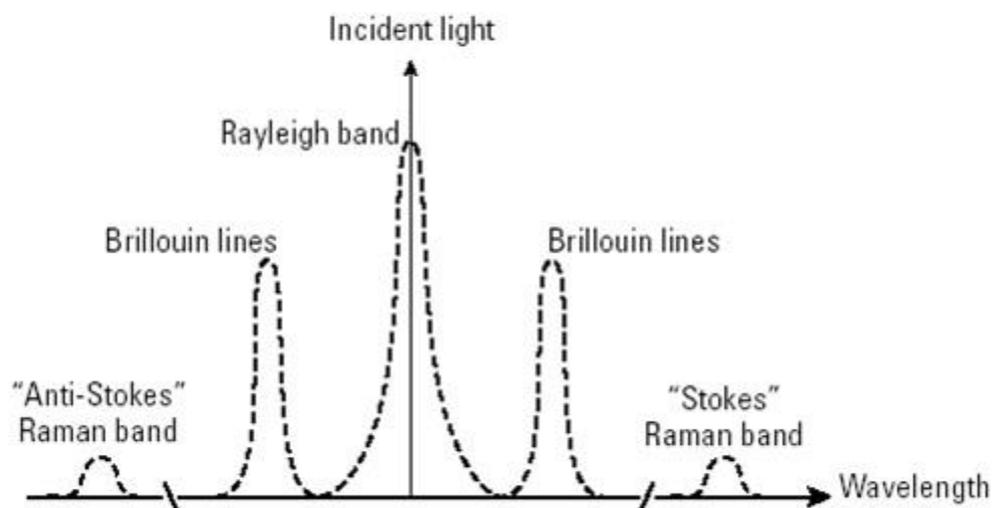


Figure 10: Type de spectre de diffusion dans la silice

L'appareil nécessite un paramétrage avant l'interprétation des mesures. Une longueur de la fibre optique doit être placée dans un milieu à température contrôlé afin de procéder à son étalonnage : correction de la pente et de l'offset.

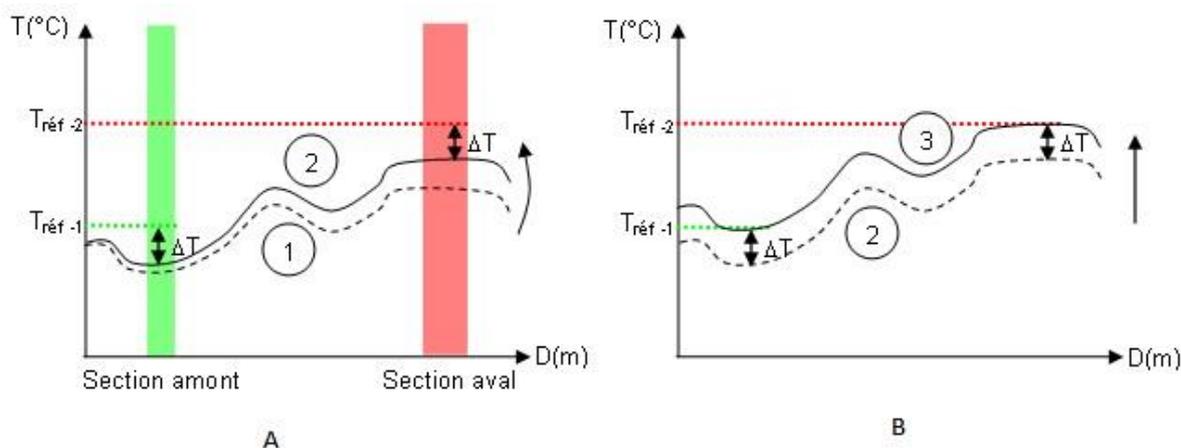


Figure 11: Exemple de correction, A correction de la pente et B correction d'offset

. A partir de là, une incertitude de mesure de +/- 0,5 °C est associée aux mesures enregistrées.



Photo 5 : Enroulement du câble optique dans la colonne

Dans notre colonne de mesure, 5 mètres de câble optique ont été placés tous les 30 cm, comme montré sur la photo 5. Le câble doit être placé de manière à ce qu'il ne soit pas pincé, écrasé ou plier, pour ne pas l'endommager.

Le câble placé dans la colonne est numéroté de 1602 à 1652, soit 50 mètres de longueur. Pour le DTS la numérotation est différente, il impose pour l'extrémité de la fibre la distance 50 et décroît jusqu'à la connectique. Le tableau suivant regroupe la conversion

des valeurs sur le DTS et sur la fibre, en Annexe un fichier de sortie de donnée sera détaillé :

Tableau 2: Correspondance des longueurs de Fibre optique

Hauteur	Valeur sur la fibre	Valeur mesurée par le DTS
30 cm	1602-1607	45-50
60 cm	1608-1614	38-44
90 cm	1615-1621	31-37
120 cm	1624-1630	22-28
150 cm	1632-1637	15-21
180 cm	1638-1644	08-14

# IV / Etude In situ : Modélisation

---

## 1/ Les quadripôles et les positions des électrodes

La **séquence de quadripôle** est un point essentiel et la qualité de l'interprétation des mesures en dépend. Elle permet de densifier suffisamment l'espace pour s'assurer que l'ensemble du milieu étudié sera observé

Les électrodes ont été définies de 1 à 40 (colonne du haut) et de 49 à 52 (colonne du bas), ce hiatus de valeurs entre 41 et 49 est dû au câblage pour le Syscal.

La méthodologie choisie pour ce séquençage est la suivante :

- Colonne du haut : 40 électrodes pour constituer 472 quadripôles, 320 considérés pour des lignes de courant horizontale, 40 pour des lignes de courant verticale, 56 pour des lignes de courant transversale horizontale et 56 pour de lignes de courant transversale verticale.
- Colonne du bas : 12 électrodes pour constituer 62 quadripôles, 6 considérés pour des lignes de courant horizontale, 12 pour des lignes de courant verticale, 26 pour des lignes de courant transversale horizontale et 18 pour de lignes de courant transversale verticale.

Après mise en commun des quadripôles, 6 quadripôles ont été retirés car présent dans les deux sélections. De plus, 4 ont été supprimés car jugés trop éloignés entre les électrodes d'injection de courant pour fournir une information valable.

Au final il reste 524 quadripôles. Il est à noter que la cellule du haut est bien mieux définis que la cellule du bas par son grand nombre d'électrodes et donc de quadripôle. Le fichier de quadripôle est joint en Annexe.

La **position des électrodes est utilisée** dans la modélisation. Elle permet de pouvoir créer des modèles, proches de la réalité, et ainsi pouvoir les comparer avec les valeurs réelles de la colonne. En annexe sont transcrites les coordonnées des positions de chaque électrode.

## 2/ Logiciels de modélisation

Les modèles numériques ont été utilisés pour configurer les paramètres d'inversion. L'inversion est l'étape essentielle pour la transcription des données brutes, cependant, sans paramètre bien définis, l'inversion peut rendre des données erronées.

Des modèles numériques ont été créés à partir de la géométrie réelle de la cellule et des électrodes et pour différente distribution de résistivité électrique. Ils ont été numérisés à partir du programme **F3D\_Lab**, développé par CLEMENT Rémi. Ce logiciel (programme Matlab) fonctionne en utilisant les fonctions de calculs du logiciel de simulation physique numérique « **COMSOL Multiphysics 4.3a** ». F3D\_Lab a été développé dans le but d'effectuer des calculs de potentiel en 2 points du milieu (à la position de 2 électrodes par exemple) pour une injection de courant en 2 autres. Sont présentés en annexe les paramètres de modélisation de F3D\_Lab.

Outre la création du modèle, ce logiciel permet le calcul des coefficients géométriques et le test de différente configuration de distribution de résistivité électrique.

F3D\_Lab a donc été utilisé pour paramétrer la configuration des mesures. La comparaison des coefficients géométriques entre la colonne et les valeurs simulées on permet de pouvoir travailler sur des modèles numériques. Et ce sont ces modèles qui ont été utilisés pour la définition de tous les paramètres d'inversion. Au final ce sont les coefficients géométrique qui permettent de validé les test de modélisation qui eux nous permettent de sélectionner les paramètre d'inversion.

Une autre particularité du logiciel est la génération de modèle variant. Le modèle créé peut être modifié sous Comsol, avec l'ajout d'une sphère ou d'un deuxième milieu de résistivité différente, et exporté sous F3D\_lab pour calculer un nouveau set de mesure de  $\Delta V$ . C'est cette option qui va nous intéresser pour générer des  $\Delta V$  avec des niveaux de saturation d'eau différents. Le but étant d'évaluer la pertinence de notre jeu de quadripôle pour représenter au mieux les variations de résistivité électrique induites par les différentes saturations du milieu.

L'inversion est faite grâce à **BERT**, *Boundless Electrical Resistivity Tomography*, logiciel développé par Thomas GUNTHER. Il permet l'inversion des données de résistivité même pour un modèle cylindrique. Il est uniquement développé sous ligne de commande. L'affichage des résultats se fait par le logiciel **Paraview**.

### 3/ Coefficient géométrique pour une électrode réelle et un point équivalent

Le point équivalent permet de travailler avec le modèle d'inversion BERT et pour juger de la corrélation entre le point équivalent et l'électrode de mesure de dimension connue, on utilise le coefficient géométrique.

Le coefficient géométrique est quant à lui un paramètre qui dépend du positionnement des électrodes d'un quadripôle. Dans notre cas il faut que nos modèles et les mesures faites sur la colonne aient le même coefficient pour être comparable.

La correspondance entre les électrodes réelles et les mesures (sur une colonne remplis d'eau) était presque identique, mais ce qui nous intéresse n'est pas l'électrode complète mais son point équivalent. Une comparaison entre les coefficients géométriques de l'électrode complète et du point équivalent est donc réalisée.

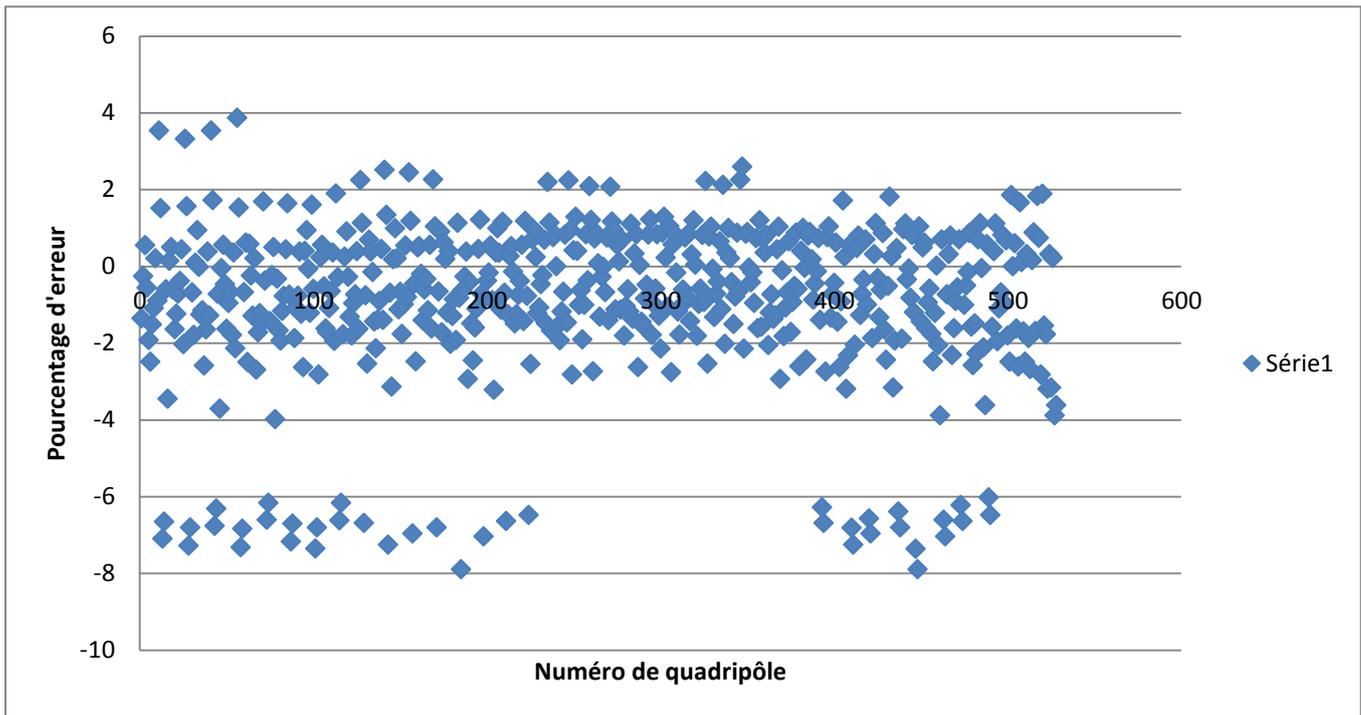
### Détermination du coefficient géométrique pour l'électrode complète par simulation et par expérience

La détermination du coefficient géométrique pour les électrodes réelles a été menée par simulation et par l'expérience au laboratoire. Les coefficients géométriques entre des résultats sur la colonne remplis d'eau et ce modélisé par F3D\_Lab ont été comparés selon la formule suivante :

$$Erreur = \left( \left( \frac{Km}{Ks} \right) - 1 \right) * 100;$$

Avec  $Km$  coefficient géométrique modélisé et  $Ks$  coefficient géométrique mesuré.

Ce qui nous donne le graphique suivant :



Graphique 2: pourcentage d'erreur entre les mesures réelles (dans de l'eau) et les mesures modélisés en électrode complète.

Toutes les valeurs sont centrées autour de -0.5% et dans un nuage de points entre plus ou moins 2.5%. Les valeurs supérieures à 3% ou -4% ont été relevées pour des quadripôles verticaux. Il a été démontré par de précédent essai de laboratoire, mené par Rémi CLEMENT, que l'impact d'une erreur sur la position exacte d'une électrode est plus important quand cette erreur correspond un une valeur verticale. Ce qui signifie que la mesure des coordonnées est moins précise en verticale et donc qu'elle impact sur les coefficients géométrique des quadripôles verticaux.

Les quadripôles supérieures à  $\pm 4\%$  sont garder pour les mesures, bien que causant un biais dans les mesures. Le choix de les garder vient d'une volonté d'avoir un maximum de données pour caractériser le milieu. De plus nous travaillons sur des comparaisons, de ce fait une erreur systématique sur les quadripôles sera répercutée sur toutes les analyses et ne faussera pas la comparaison des résultats.

### Le coefficient géométrique pour le point équivalent

Le logiciel d'inversion BERT considère la position d'un point équivalent pour l'injection de courant et la mesure de potentiel alors que l'électrode utilisée a une géométrie non négligeable. Les mesures ERT faites sur le terrain, associent un point à la position des électrodes, ce qui est justifié par l'écartement important devant la taille des électrodes. Sur une colonne de mesure, cette approximation n'est plus valide et la position d'un point équivalent doit être recherchée selon la géométrie de la cellule d'essai, des électrodes et de leur enfoncement dans le milieu.

Le premier travail de modélisation a donc été de définir un point équivalent qui aurait le même effet qu'une électrode complète. Avec le logiciel *F3D-Lab*, des calculs de coefficient géométrique pour différentes positions de points situées le long de l'axe de symétrie de l'électrode

ont été réalisés (cf. Rapport de Laura CHEVALIER). Le point équivalent correspond à 0.0235 m de l'extrémité de la longueur de l'électrode complète.

Pour mieux appréhender la position du point équivalent, la figure 12 nous montre une électrode implantée dans un bloc avec son point équivalent. Les paramètres d'enfoncement de l'électrode correspondent à ceux de la colonne d'étude. L'électrode est enfoncée de 3 cm dans le bloc et le point équivalent est donc positionné à 2.35cm suivant l'axe (point noir sur la figure 10), cette distance est prise par rapport au bord interne de la colonne.

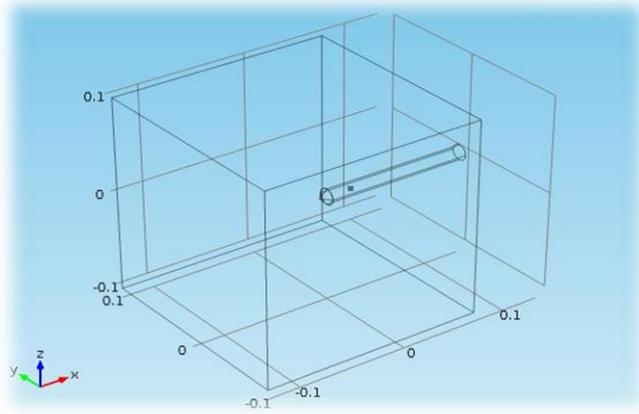
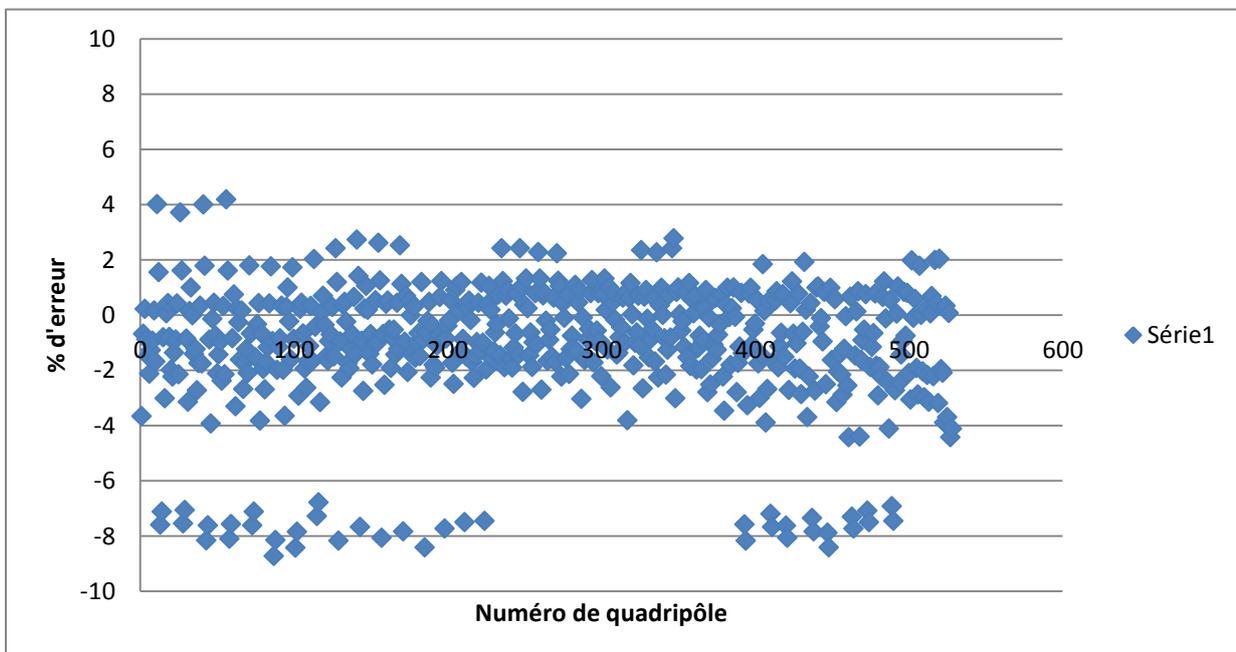


Figure 12: Electrode et point équivalent

Tous les coefficients géométriques pour la cellule équipée d'électrode « réelle » (simulation) ou représentée par un point équivalent ont été calculés et comparés (Graphique 3). On peut remarquer que l'erreur est de -8 à 4% par rapport aux électrodes complètes. Il est aussi à noter que les erreurs les plus importantes sont celles des quadripôles verticaux, sans ces derniers l'erreur est de  $\pm 3\%$ .

Le point équivalent est utilisé pour l'inversion, en effet le logiciel BERT ne peut inverser que des électrodes en forme de point. Une fois le point équivalent défini, les tests de paramétrisation d'inversion sous Bert peuvent être lancés.



Graphique 3: Pourcentage d'erreur entre le point équivalent à 0,0235 et l'électrode complète.

Les quadripôles qui sont, encore une fois supérieurs, sont gardés, leurs erreurs étant faible il ne devrait pas impacter les inversions, de plus les garder accroît la résolution des mesures.

## 4/ Les tests effectués et les paramètres d'inversion

Pour la modélisation, on part du postulat que le milieu d'étude sera de résistivité homogène, à 20  $\Omega$ .m, et que l'injection de lixiviat va modifier cette résistivité en l'abaissant à 2  $\Omega$ .m.

Pour connaître l'action sur les mesures de résistivité de deux couches à résistivité différente, des modèles avec des paliers à différentes hauteurs ont été réalisés. Six paliers ont été choisis, à 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5 et 1.8m (saturation complète de la colonne).

Chaque modèle a été créé sous *Comsol*, calculé par *F3D-Lab*, inversé à l'aide de BERT et représenté sous *Paraview*.

Dans une inversion, les principaux paramètres à sélectionner sont le lambda  $\lambda$ , le Z-weight, le blocky model et le paramètre de robustesse.

Le « **Z-weight** » permet de rajouter une contrainte de déformation dans l'inversion. Il applique un filtre en contraignant la forme de la déformation dans l'inversion. La valeur par défaut est 1, ce qui signifie que la contrainte sera aussi verticale que horizontale. Une valeur inférieure à 1 implique une anomalie horizontale et supérieure à 1 une anomalie verticale.

L'option « **Robuste** » est utilisée pour contraindre le bruit. Si les données sont trop bruitées, le paramètre robuste va amortir l'impact des variations brutales entre deux points de mesure, dû au bruit, lors de l'inversion.

Le paramètre « **Lambda  $\lambda$**  » s'apparente à un facteur d'amortissement de l'inversion. Ce facteur varie sur une grande gamme de valeurs, de 0 à 1000. Plus les valeurs sont proches de 0 plus l'inversion va tenter de lisser et d'amortir les variations de résistivité. Au-delà de 100 les variations de résistivité seront plus prononcées et peu amorties.

La dernière contrainte de variation est le « **Blocky model** ». Cette fonction permet de créer des modèles avec des variations abruptes aux interfaces de résistivité. De plus dans chacune des régions de résistivité il va essayer d'homogénéiser les valeurs.

Etant dans un milieu homogène et sans bruit, les paramètres de robustesse et blocky model importent peu. Les paramètres suivis sont donc lambda et le Z-weight.

Différents tests de Z-weight ont été effectués et leur impact sur le résultat est négligeable.

Une série de tests a donc été effectuée pour le paramètre lambda :

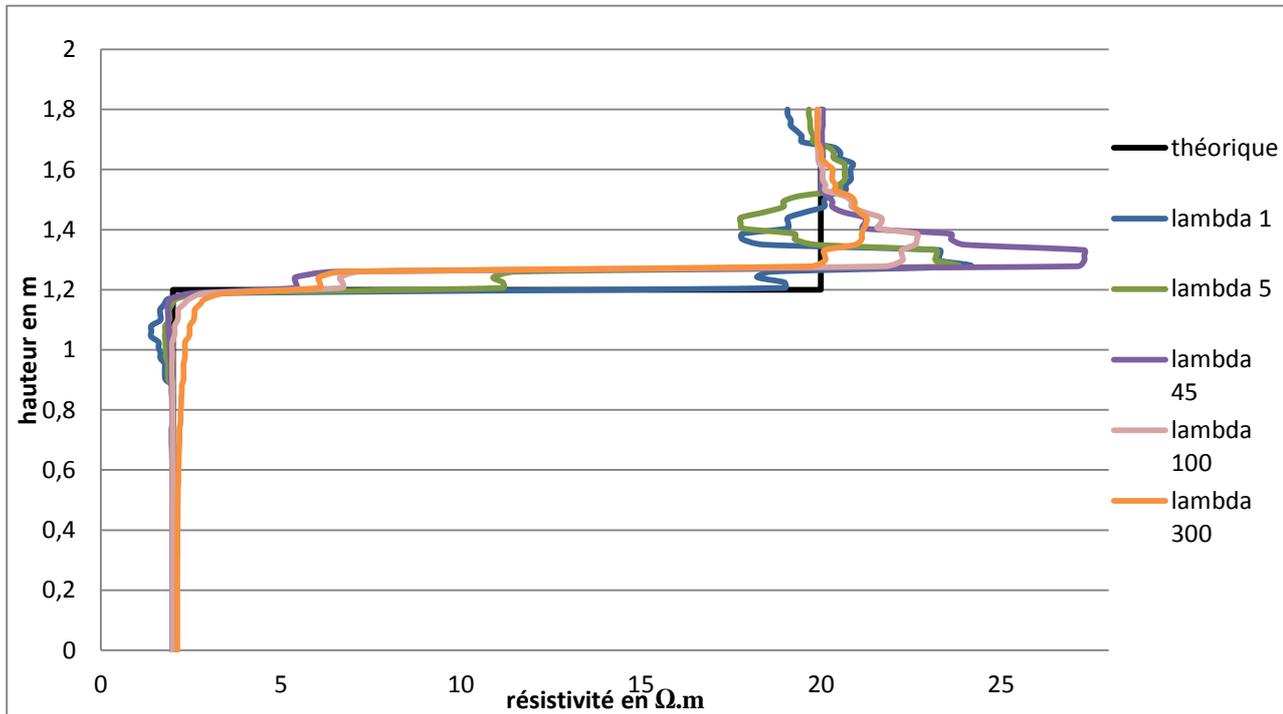
- Test de la variation de lambda de 1, 5, 10, 20, 25, 30, 40, 45, 50, 55, 70, 100, 200 à 300 pour les paliers 0.6 et 1.2 m.
- L'analyse des résultats s'est faite selon les valeurs de résistivité au centre et selon l'axe de la colonne et également par moyenne de tranche de 15 cm de hauteur.

Les résultats sont montrés et discutés dans la partie 5 à suivre.

## 5/ Performance de l'outil : lambda et maillage :

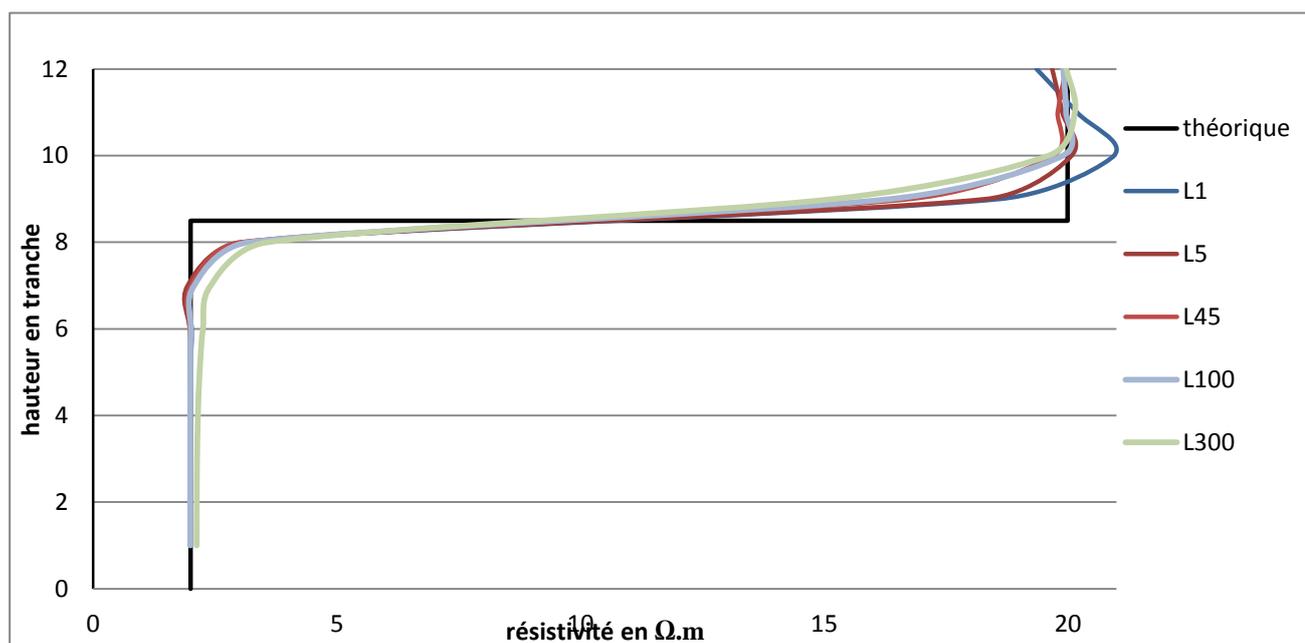
### **a- L'effet lambda :**

Lors des tests de modélisation à différentes hauteurs de saturation, un artéfact est apparu. Quand on représente les résistivités suivant l'axe central z, pour une hauteur de 1.8m, sur un graphique en fonction des lambda utilisés on obtient ceci :



Graphique 4: Variation des valeurs de résistivité suivant l'axe central z

Tous les lambda ne sont pas représentés sur ce graphique, pour une question de lisibilité. En noir, sont représentées les valeurs théoriques de résistivité, c'est-à-dire de 0 à 1.2 m, 2 $\Omega$ .m en résistivité et de 1.2 à 1.8, 20 $\Omega$ .m. Ce graphique montre un pic de résistivité, quel que soit le lambda, au niveau de l'interface 2-20 $\Omega$ .m. Pour essayer de le déterminer et voir s'il ne s'agit pas d'un effet pépète, des moyennes ont été calculées par tranche de 15 cm :



Graphique 5: Variations de résistivité par tranche de 15cm

On peut remarquer que même en moyennant sur une tranche de 15cm ce pic est toujours présent. Exemple, l'inversion pour un lambda 45 :

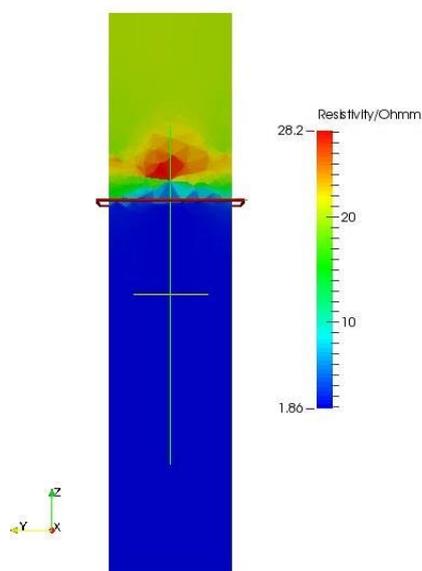


Figure 13: Modélisation de l'inversion BERT pour le palier 1.2 et au lambda 45

Sur la figure 13, on discerne deux parties principales : la partie Bleue à environ  $2\Omega.m$  et la partie en Rouge rosé à  $20\Omega.m$ . A aussi été représentée la hauteur théorique de la limite entre les deux milieux pour 1.2m de hauteur (trait rouge). A l'interface, une zone intermédiaire apparaît. Une zone Rouge apparaît juste au-dessus de cette interface à une valeur de  $28\Omega.m$ . C'est cette zone qui est visible sur les graphiques. Le logiciel BERT a calculé dans cette zone un milieu de forte résistivité.

Une zone dite à forte résistivité se traduit électriquement par une zone avec peu de ligne de courant qui transite dedans.

En annexe est présenté un test sur la distribution des lignes de courant pour expliquer ce phénomène.

Le lambda est un paramètre qui a permis de mettre en évidence un effet du logiciel d'inversion. Dans une colonne de mesure de cette taille, l'effet est concentré donc accentué. Le lambda est choisi de manière à diminuer cet artéfact dans les résultats. Le lambda choisi est le lambda 45.

## b- Le maillage

Le maillage de l'inversion est un choix délicat qui demande beaucoup d'attention. Le maillage peut montrer des choses différentes pour un même jeu de données. Si le maillage est trop fin pour une faible quantité de données, l'inversion va extrapoler et créer des zones inexistantes. A contrario, si le maillage est trop grand l'inversion va passer à côté d'informations qui seront mélangées et moyennées dans la masse du tétraèdre.

Mis à part les 4 paramètres d'inversion cités précédemment, 2 autres paramètres sont à suivre, PARA3DQUALITY et PARAMAXCELSIZE. Ces deux fonctions définissent le maillage. L'un définit la vitesse de croissance du maillage et l'autre la taille de la cellule (tétraèdre) la plus grande.

Le logiciel donne comme paramètre pour PARA3DQUALITY une gamme de valeur entre 1.1 (lent) et 2 (rapide). C'est sur cela que l'on va jouer pour définir notre maillage. Pour le paramètre PARAMAXCELSIZE aucune gamme n'est donnée mais il faut que les valeurs restent dans l'ordre de grandeur de l'objet inversé.

Des modèles ont donc été faits. On place dans une colonne de résistivité de  $20\Omega.m$  une sphère de  $0.1m$  de rayon à une résistivité égale à  $10\Omega.m$ . Le résultat obtenu pour des paramètres de croissance de 1.12 avec une taille maximale de tétraèdre ( $A = 0.0001 m^3$  et  $B = 0.001 m^3$ ) donne la Figure suivante :

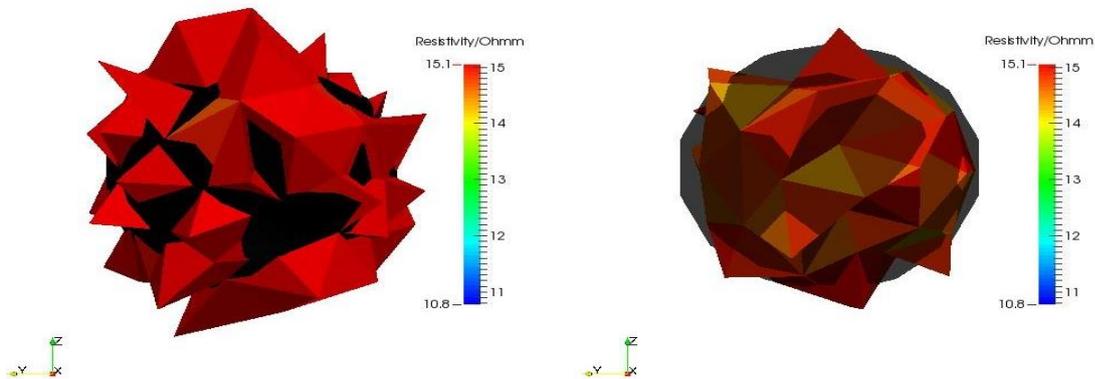


Figure 14: Comparaison de l'effet de la taille maximum de tétraèdre sur la définition d'une sphère,  $A=0.0001m^3$  et  $B=0.001m^2$ .

Si on regarde cette figure on peut voir que pour un meilleur maillage (tétraèdre plus petit), mais pour la même valeur de résistivité (ici placée à un maximum de  $16\Omega.m$ ), la définition de la sphère modélisée est plus grande que la sphère théorique représenté en noir.

De plus il est à noter que pour retrouver la sphère théorique il faut prendre les valeurs de résistivités de  $16\Omega.m$  alors qu'initialement elle est de  $10\Omega.m$

L'effet de la taille maximum du tétraèdre impacte peu le résultat, cependant la croissance du maillage joue un rôle. Une croissance lente aura pour effet de créer plus de tétraèdre. La croissance part des parois de la colonne pour aller au centre ce qui implique une plus grande quantité de mailles sur les bords et donc autour des électrodes. Si une trop forte définition est faite autour des électrodes, les effets dus aux électrodes seront visibles et modifieront notre jugement sur le milieu.

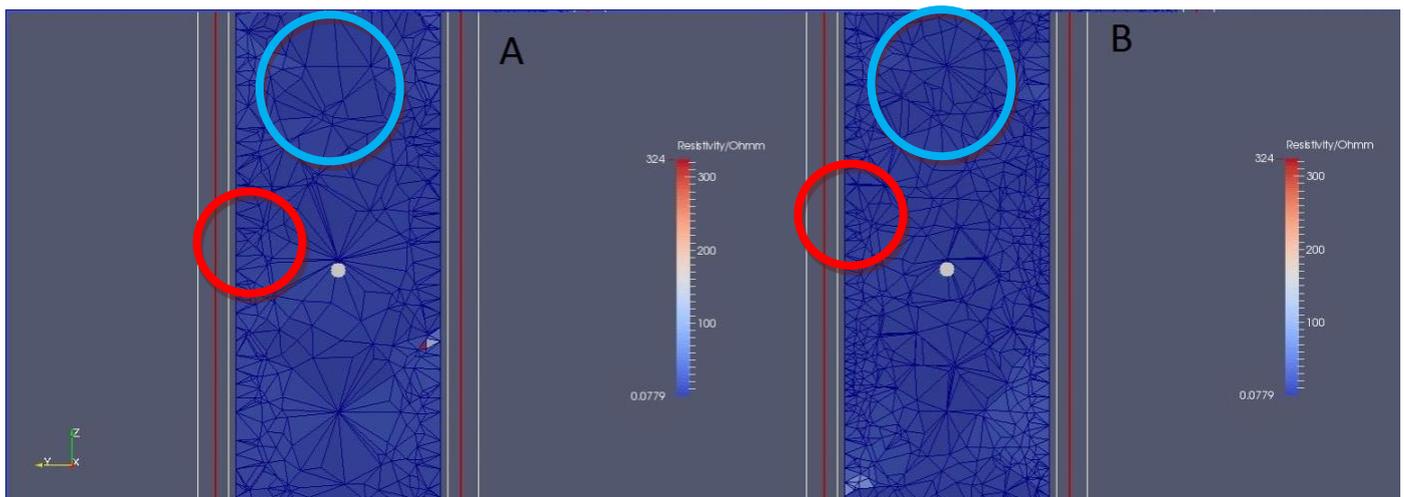


Figure 15: Exemple de maillage, A vitesse de croissance de 1.5 et B 1.2

Le maillage est meilleur avec une vitesse de croissance de 1.2 mais la définition autour des électrodes est plus forte, comme montré par les cercles rouge sur la figure 15. Cependant au centre la définition est meilleure, cercle bleu.

Des tests de maillage ont également été effectués pour des vitesses inférieures à 1.2 mais le résultat n'a pas été concluant car le maillage était fin mais surpeuplé sur les bords et prenais un temps considérable de calcul.

### c- Les Paramètres d'inversion :

Grâce à tous ces modèles, les paramètres d'inversion sélectionnés pour cette étude sont :

Tableau 3: Paramètre d'inversion

Paramètres	Valeurs	Fonction
<b>PARA3DQUALITY</b>	1.2	Définis la vitesse de croissance du maillage (1.1-lent, 2-rapide)
<b>PARAMAXCELSIZE</b>	0.001	Taille de la plus grande cellule en m <sup>3</sup>
<b>Lambda <math>\lambda</math></b>	45	Régularisation (0=structuré, >100 lissé)
<b>Z-Weight</b>	1	Contrainte verticale ou horizontale (1=isotrope, <1 en couche, >1 verticale)
<b>RobustDATA</b>	/	Fonction du bruit sur les données
<b>BlockyModel</b>	1	Lissage sur les bordures des variations de résistivité

### d- Validation des paramètres sélectionnés à l'aide d'une sphère se déplaçant dans le milieu:

Un test avec une sphère dans une colonne à différentes hauteurs a été réalisé, les paramètres utilisés sont ceux cités précédemment. Il est à noter, sur la figure 16, que les sphères noires ont la même taille.

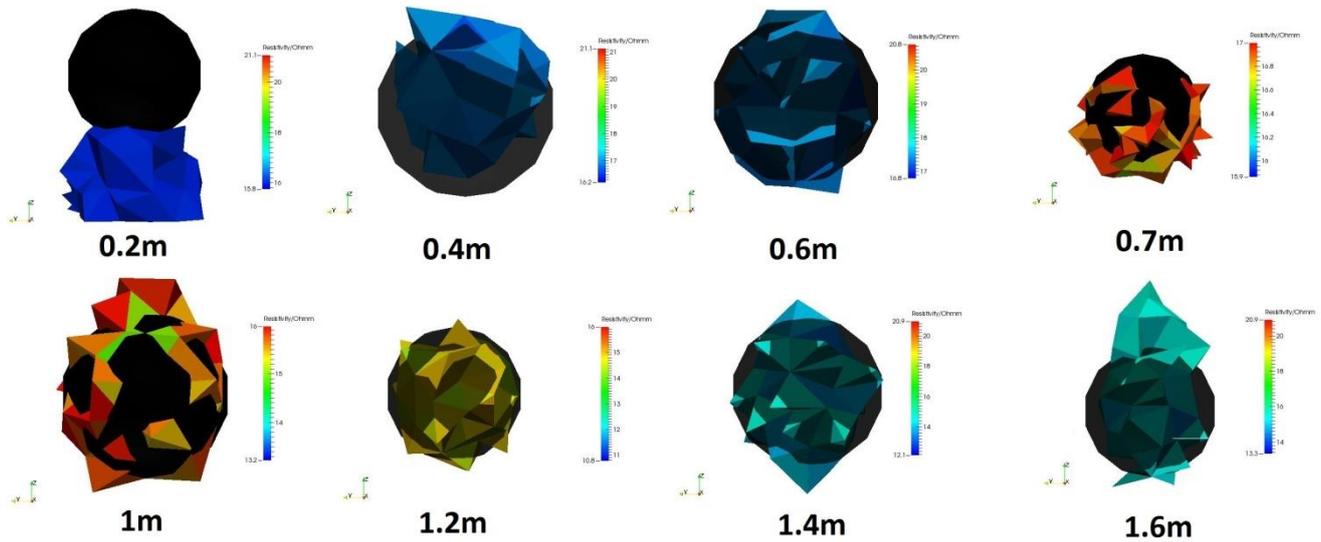


Figure 16: Représentation des sphères modélisées et inversées dans la colonne (la colonne n'est pas représentée)

Cette figure représente la modélisation numérique d'une sphère de résistance  $10\Omega.m$  dans un milieu de  $20\Omega.m$ . Chaque image représente la sphère à des hauteurs différentes. Il est à noter qu'en moyenne, la gamme de valeur à prendre pour bien identifier la sphère, est de l'ordre de  $16\Omega.m$ . En noir (semi-opaque) sont placées les sphères théoriques de  $0.1m$  de rayon.

Les sphères correspondent respectivement aux hauteurs  $0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4$  et  $1.6$  mètres. Comme on peut le remarquer, les sphères placées en haut et en bas de la colonne ( $0.2$  et  $1.6$ ) ne sont pas positionnées à l'emplacement théorique ce qui montre l'effet de bord sur les mesures de résistivités et l'inversion. On peut aussi identifier le fait que les sphères modélisées dans la colonne du haut sont mieux représentées que celles de la colonne du bas.

Pendant sachant que nous étudions des variations de niveau d'eau, la limite numérisée est toujours définis à la bonne hauteur :

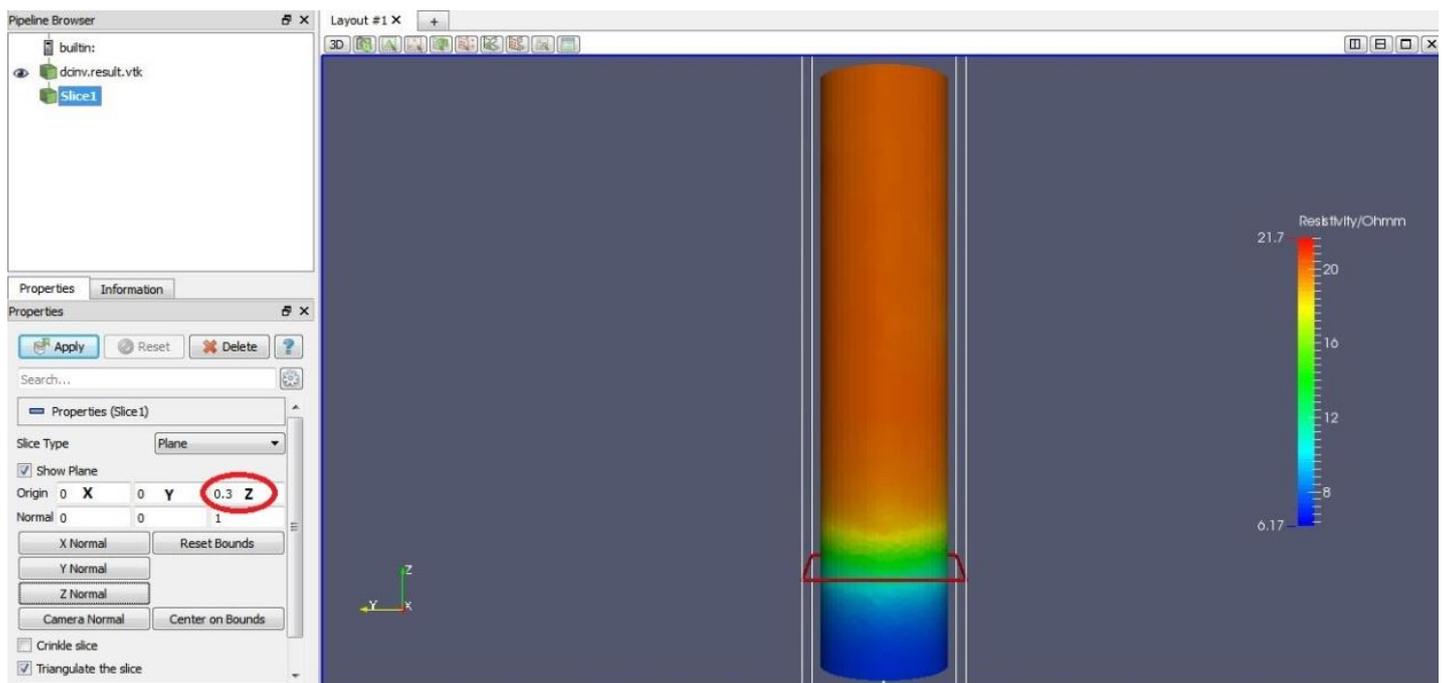


Figure 17: Validation du niveau d'eau dans la cellule modélisée à  $0.3m$

La figure 17 montre une inversion d'un modèle numérique à 2 couches, dont l'interface se situe à 0.3m du bas de la colonne.

Pour conclure, notre choix de paramétrisation s'est focalisé sur ce que nous cherchions, c'est-à-dire suivre l'évolution hydrique dans la colonne. Cette paramétrisation n'empêche cependant pas de voir l'effet, s'il existe, de la pression dans la colonne car il ne s'agira pas d'un point localisé mais de tout un volume concerné de grande taille. Cependant pour une étude précise par tranche ou zone de colonne nous devons prendre en compte cet effet de bord et ne pas commenter les zones en partie basse de la colonne.

## V/Etude de laboratoire :

### 1/Matériel :

L'étude sur la colonne se fait à partir de déchet ménager non dangereux. Ce déchet a été collecté directement sur un site de stockage basé à Cuves (50), sur le lieu-dit Champ Jouault. L'équipe s'est déplacée sur le site pendant deux jours, où elle a été aidée par ses collègues d'Irstea de Rennes qui ont procédé à la caractérisation du déchet après avoir été trié.

Les déchets proviennent de 3 gisements : les OM (Ordures Ménagères), les DIU 1 et 2 (Déchets Industriels Ultimes). Les DIU sont différenciés en catégories 1 et 2 car ils proviennent de deux zones industrielles différentes.



Photo 6: Broyage du déchet

La technique de caractérisation normalisée (NF EN 14899) était simple : pour avoir un produit représentatif, une quantité de déchet donné était divisé en sous-catégorie équivalente de manière aléatoire et un lot était tiré au sort et retenu. On remplissait 4 poubelles avec une pelleté de déchets, quand les poubelles étaient pleines on les pesait. Une poubelle sélectionnée au hasard était prise par notre équipe pour la colonne et une autre poubelle prise par l'équipe de Rennes pour la caractérisation. Toute la masse de déchet collecté est pesée ainsi que les échantillons sélectionnés. Cette méthode a été appliquée sur les 3 types de déchets.

D'après l'étude de caractérisation, les proportions à suivre pour remplir noter colonne de déchets sont les suivantes :

Tableau 4 : Proportion de chaque type de déchet

<b>OM</b>	<b>46,1 %</b>
<b>DIU 1</b>	<b>35,2 %</b>
<b>DIU 2</b>	<b>18,7 %</b>

De retour au laboratoire, il a été décidé de broyer le déchet pour l'adapter à la taille de la cellule et ainsi homogénéiser les hétéroclites qui pourraient gêner dans la colonne. Le déchet résultant, après broyage, est de taille comprise entre 10 mm et de la poussière. Les déchets contenus dans chaque

bac ont été broyés et homogénéisés en fonction de leur type. Aucun mélange entre OM et DIU n'a été fait avant la préparation de la colonne.

Des échantillons d'1 kg ont été prélevés sur les 3 types de déchet et mis à l'étuve pour en connaître la teneur en eau initiale (méthode gravimétrique).

Une fois les déchets broyés et homogénéisés, il a fallu préparer les échantillons pour remplir la colonne.

Nous avons décidé de remplir la colonne par couche de déchet afin de contrôler au mieux la densité. Des bacs ont été prévus pour remplir des couches de 15 cm avec une densité choisie de 0,3. La densité est choisie à 0.3 car elle correspond aux valeurs dans les ouvrages de stockage. On trouve sur le terrain des valeurs de densité allant de 0.3 à 0.7. Nous avons sélectionné la valeur la plus basse pour optimiser le temps de transfert de lixiviat dans le déchet. Il est à noter que les couches du haut et du bas (top et bot) de la colonne ne feront pas exactement 15 cm. Dans la partie basse (bot) 2 géo-grilles ont été déposées pour empêcher le déchet de refluer, l'épaisseur totale de ces deux géo-grilles est de 1.2 cm. Pour la partie top, 2 géo-grilles sont aussi mises en place. Des bacs avec des proportions spéciales pour les couches top et bot ont donc été préparés. On aura donc des calculs spécifiques pour ces 3 catégories : tranche standard, top, bot.

Lors du remplissage de la colonne, il s'est avéré que le tassement du déchet a été plus facile que prévu. Les objectifs de densité ont donc été revus. Les bacs prévus initialement pour 15 cm sont devenu des bacs pour des tranches de 10 cm et la densité a donc été évaluée à 0.45.

Lors du remplissage, à chaque hauteur de 30 cm, 5 mètres de fibre optique ont été enroulés (Voir Photo 5 page 28).

## 2/protocole d'essai :

### **a- Le protocole :**

Une fois les tests lancés il est impossible de revenir à un état antérieur, c'est-à-dire que l'on ne pourra jamais revenir à l'état initial de remplissage considéré comme l'état sec. Un protocole de mesure a donc été mis en place pour optimiser la prise de mesure. L'objectif principal étant de suivre une évolution hydrodynamique ainsi que l'impact de la pression de gaz sur les mesures de résistivité, le protocole suivant a donc été défini :

- Prendre une mesure de résistivité électrique à l'état sec ;
- Saturer la colonne et prendre une mesure de résistivité électrique ;
- Désaturer la colonne pour atteindre la capacité au champ et prendre une mesure de résistivité électrique ;
- Effectuer des mesures de résistivité électrique durant la mise en pression de gaz de la colonne de déchets.

Ce protocole s'est créé au fur et à mesure de la manipulation, à l'origine la pression devait être suivie lors de la montée en eau dans la colonne, cependant des problèmes de fuite ont dû être résolus pour poursuivre la manipulation.

Un total de 42 mesures a été effectué sur 4 états hydriques différents : état sec, saturé, partiellement saturé et à capacité au champ.

## b- Les essais

La manipulation se découpe en 18 étapes (voir Figure 16), chaque étape correspond à une séquence de mesure. Le code couleur est le suivant : jaune= état sec, bleu= état saturé, vert clair= déchet à capacité au champ à pression atmosphérique et vert foncé= déchet à capacité au champ sous pression.

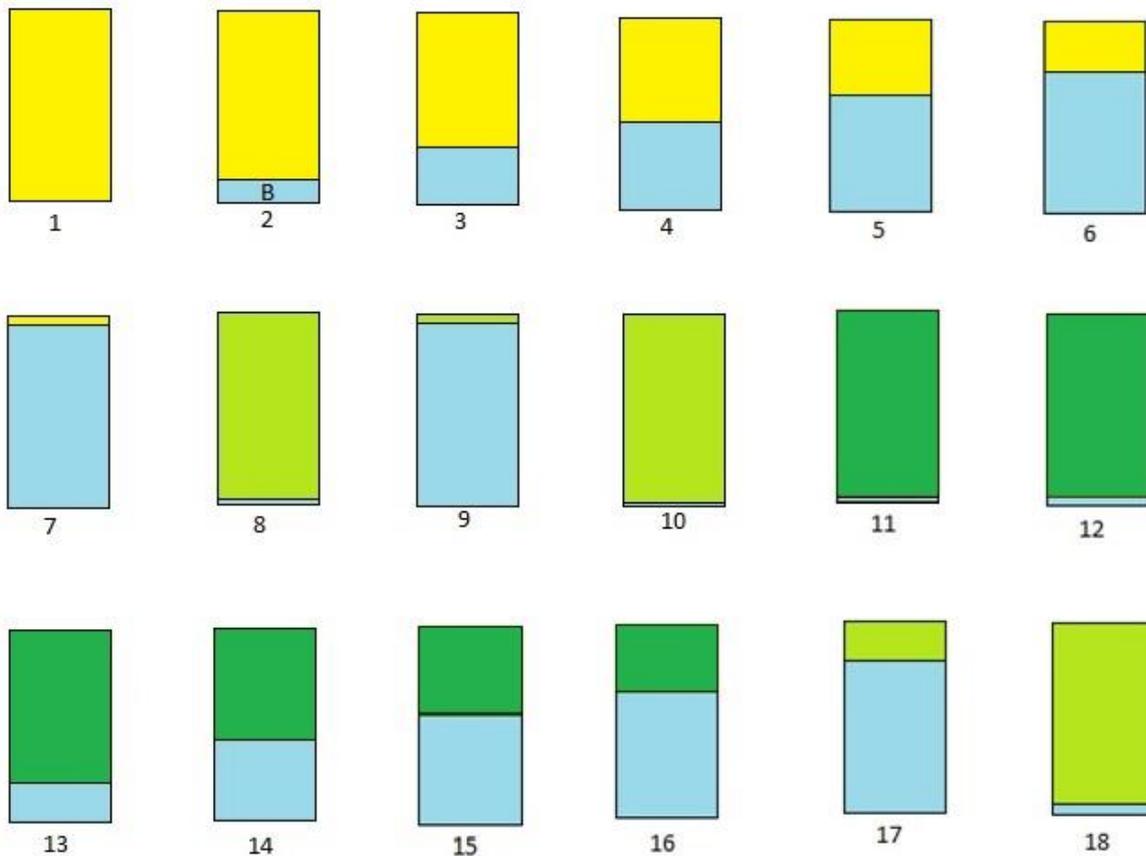


Figure 18: Les différents états des mesures Syscal

- Les 6 premières étapes correspondent au remplissage de la colonne à pression atmosphérique (schémas 2 à 7). Cet essai a permis de suivre la saturation de la colonne grâce aux mesures de résistivité.
- Une mesure (schéma 8) a été prise à la capacité au champ, au bout d'une nuit de drainage.
- Une deuxième saturation (schéma 9) a été faite pour pouvoir refaire des tests en repartant de la capacité au champ (schéma 10).
- Une fois les fuites bouchées, la colonne a été coupée de tout contact avec l'atmosphère, et la pression est montée naturellement. Une mesure a été prise à 0,12 bar (schéma 11) et une autre à pression stabilisée de 0.15 bar (schéma 12)
- Les derniers tests correspondent à une augmentation manuelle de la pression par augmentation de la charge hydrostatique (schéma 13 à 16).
- Une mesure (schéma 17) a été réalisée après la mise à pression atmosphérique.
- Pour terminer une ultime prise de donnée a été faite sur la colonne à capacité au champ pour une pression de 0,165bar (Schéma 18).

### 3/Teneur en eau :

#### a- La teneur en eau initiale

La teneur en eau est un des paramètres les plus influents sur les mesures de résistivité. Il a donc fallu la suivre de manière précise, autant en début de manipulation que tout au long de l'essai. Les teneurs en eau ont été calculées à chaque état hydrique à partir des volumes d'eau introduits ou évacués selon que l'on atteigne la saturation ou la capacité au champ.

Les échantillons mis dans l'étuve nous ont permis de calculer la teneur en eau massique initiale du déchet. Ils y ont été placés pendant 3 jours à 60°C (méthode Gravimétrique). La température de 60°C a été choisie pour éviter un risque de combustion de la matière. L'arrêt du séchage est déterminé selon l'évolution de la perte en masse de la matière à sécher. Il est arrêté quand la perte d'eau est inférieure à quelques grammes pendant plusieurs heures.

Les valeurs mesurées sont les suivantes :

Tableau 5: Teneur en eau du déchet

	Masse initiale (kg)	Masse finale (kg)	Teneur en eau massique (kg/kg)
OM	1.31	0.87	0.51
DIU 1	1.40	1.31	0.07
DIU 2	1.11	0.95	0.17

Nous recherchons à faire un déchet de 0.3 de densité. Ce déchet sera introduit par couche de 15cm dans la colonne pour faciliter le maintien de cette densité. A partir de cela nous avons déterminé une masse de déchet de 5,44kg pour remplir cette couche de 15cm à une densité de 0.3.

Connaissant les proportions de chaque type de déchet et la masse à atteindre nous avons pu déterminer la quantité de déchet par classe à mettre dans nos bacs de 15cm. De plus avec les teneurs en eau par déchet nous avons calculé la part de matière sèche et d'eau (voir le tableau 6)

Tableau 6: Proportions massiques

	Masse (kg)	Matière sèche (kg)	Eau (kg)
OM	2.51 (46.1 %)	1.67	0.84
DIU 1	1.92 (35.2 %)	1.79	0.12
DIU 2	1.02 (18.7 %)	0.87	0.15
Somme	5.45 (100 %)	4.33	1.11

Il a été décidé de rajouter 3 litres d'eau par bac (5,45 kg de déchet) pour augmenter la teneur en eau. Cette teneur en eau après ajout est de 0.9495 kg/kg en massique et de 0.22 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> en volumique.

## b- Teneur en eau par tranche

Lors de la mise en place dans la colonne, le déchet s'est tassé beaucoup plus facilement que prévu, un bac prévu pour 15 cm est donc devenu un bac pour 10 cm.

La même masse de déchet étant dans un volume plus petit, la densité du déchet est passée à 0.45 avec une teneur en eau volumique de  $0.34 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , la teneur en eau massique ne bouge pas car la masse reste la même, ainsi que le volume d'eau présent dans le déchet.

Au final nous nous retrouvons avec les valeurs suivantes en fonction des couches :

Tableau 7: Masse et Teneur en eau des couches de déchets

	Standard (10 cm de haut)			TOP (4 cm de haut)			BOT (8.4 cm de haut)		
	Masse (kg)	Matière sèche (kg)	Eau (kg)	Masse (kg)	Matière sèche (kg)	Eau	Masse (kg)	Matière sèche (kg)	Eau
<b>OM</b>	2,51	1,67	0,84	1,84	1,22	0,62	2,24	1,49	0,75
<b>DUI 1</b>	1,92	1,79	0,12	1,41	1,32	0,09	1,71	1,60	0,11
<b>DUI 2</b>	1,02	0,87	0,15	0,75	0,64	0,11	0,91	0,78	0,13
<b>total</b>	5,45	4,33	1,11	4,00	3,18	0,82	4,86	3,87	0,99

	Teneur en eau Massique (kg/kg)	Teneur en eau Volumique (m3/m3)
<b>Standard</b>	0,95	0,34
<b>TOP</b>	0,95	0,39
<b>BOT</b>	0,95	0,35

La teneur en eau massique est calculée avec l'addition des 3L d'eau et on part du postulat que 1L d'eau équivaut à 1kg.

Elle est calculée suivant cette formule :

$$\theta_m = \frac{(V_{ed} + E_a)}{M_{ms}} ;$$

$\theta_m$  : Teneur en eau massique ;  $M_{ed}$  : masse d'eau dans le déchet ;  $E_a$  : masse d'eau rajoutée au déchet ;  
 $M_{ms}$  : masse de matière sèche.

La teneur en eau volumique est quant à elle calculée par la formule suivante :

$$\theta_v = \frac{\left(\frac{V_E}{V_C}\right)}{1000} ;$$

$\theta_v$  : Teneur en eau volumique ;  $V_E$  : volume d'eau dans le milieu ;  $V_C$  : volume total du milieu, le 1000 permet la conversion entre  $\text{cm}^3$  et Litre.

Le suivi de la teneur en eau dans la colonne durant l'essai a été plus simple à réaliser, mais avec plus d'incertitude. Lors des manipulations, le volume d'eau introduit ou collecté a été enregistré. Comme dans la nature rien ne se perd et rien ne se crée, les volumes d'eau entrés et sortis sont donc utilisés pour la détermination de la teneur en eau, outre l'évaporation et la consommation par les bactéries.

Attention, il faut prendre en compte deux problèmes physiques, la colonne mesure 1.8 mètre de hauteur cependant le déchet lui n'est pas présent sur toute cette hauteur. En bas de la colonne une géo-grille est placée pour retenir le déchet, ce qui représente 1,6cm et en haut le tassement à créer un manque de 6cm.

### c- Teneur en eau dans la colonne

Le tableau 8 regroupe toutes les informations qui sont liées aux mesures depuis le début de l'expérience. Il reprend les volumes d'eau entrée et sortie qui nous ont permis de calculer la teneur en eau du milieu. Il est à noter que nous partons du postulat que la répartition de l'eau est homogène dans la colonne, hors il est faux. Les valeurs de teneur en eau ne sont pas du tout homogènes dans la colonne mais n'ayant aucune sonde de mesure précise pour déterminer les valeurs nous ne pouvons que faire cette hypothèse pour avoir une connaissance générale de l'état de la colonne.

Tableau 8:Récapitulatif des toutes les informations liées aux mesures

	Etat	Niveau d'eau (m)	Masse déchet (kg)	Volume d'eau colonne (L)	Volume d'eau entrée (L)	Volume d'eau sortie (L)	Volume d'eau totale (L)	Teneur en eau déchet	Teneur en eau saturation
15-mai	Sec	0	95.97	72.5	0	0	72.5	0.34	0
15-mai	Semi sat	0.29	95.97	72.5	15.58	0	88.08	0.34	0.76
15-mai	Semi sat	0.598	95.97	72.5	28.32	0	100.82	0.34	0.72
15-mai	Semi sat	0.93	95.97	72.5	41.45	0	113.95	0.34	0.7
15-mai	Semi sat	1.24	95.97	72.5	55	0	127.5	0.34	0.7
15-mai	Semi sat	1.49	95.97	72.5	67.44	0	139.94	0.34	0.71
15-mai	Saturé	1.72	95.97	72.5	79.27	0	151.77	/	0.71
16-mai	CP	0.016	95.97	151.77	0	67.24	84.53	0.39	/
21-mai	Saturé	1.72	95.97	84.53	67.11	0	151.64	/	0.72
22-mai	CP	0.02	95.97	151.64	0	64.8	86.84	0.41	/
23-mai	CP	0.085	95.97	86.84	0	0	86.84	0.38	/
24-mai	CP	0.12	95.97	86.84	0	0	86.84	0.36	/
24-mai	semi sat	0.545	95.97	86.84	18.45	0	105.29	0.36	0.71
28-mai	semi sat	0.9	95.97	86.84	33.86	0	120.7	0.36	0.71
28-mai	semi sat	1.15	95.97	120.7	44.71	0	165.41	0.36	0.71
30-mai	semi sat	1.37	95.97	165.41	54.26	0	219.67	0.36	0.71
30-mai	semi sat	1.51	95.97	86.84	60.34	0	147.18	0.36	0.71
03-juin	CP	0.011	95.97	147.18	0	36.503	110.677	0.5	/

	Etat	Pression relative (bar)	Conductivité (mS/cm)	Température (°C)	pH	Heure mesure SYS
15-mai	Sec	0	/	/	/	8h56
15-mai	Semi sat	0	/	/	/	11h17
15-mai	Semi sat	0	/	/	/	12h52
15-mai	Semi sat	0	/	/	/	13h40
15-mai	Semi sat	0	/	/	/	15h50
15-mai	Semi sat	0	/	/	/	16h40

15-mai	Saturé	0	/	/	/	17h25
16-mai	CP	0	5.29	/	/	14h16
21-mai	Saturé	0	/	/	/	16h14
22-mai	CP	0	5.8	/	/	8h14
23-mai	CP	0.12	/	/	/	15h15
24-mai	CP	0.151	/	/	/	11h52
24-mai	semi sat	0.265	/	/	/	15h17
28-mai	semi sat	0.171	/	/	/	11h10
28-mai	semi sat	0.32	/	/	/	13h56
30-mai	semi sat	0.195	/	/	/	10h49
30-mai	semi sat	0	8.23	/	5.87	16h30
03-juin	CP	0.165	/	/	/	9h26

#### 4/Mesures et inversion :

##### a- Mesures SYSCAL :

Le nombre de mesures faites est de 42. Sauf pendant la saturation initiale (schéma 2 à 7), trois mesures de résistivité ont toujours été faites, afin de palier au souci de répétabilité de la mesure. Le tableau ci-dessous résume les mesures avec leurs conditions de prise de mesures :

Tableau 9: Récapitulatif des mesures SYSCAL

Nom du fichier	Info	Schéma figure 16	nombre de répétition	
Sec	15-mai A sec	1	3	
M 1	15-mai Remplissage	2	1	
M 2	15-mai Remplissage	3	1	
M 3	15-mai Remplissage	4	1	
M 4	15-mai Remplissage	5	1	
M 5	15-mai Remplissage	6	1	
M 6	15-mai Saturation	7	1	
CP	16-mai CP mesure le lendemain après une nuit de vidange	8	3	
Sat	21-mai Re-saturation	9	3	
CP 22	22-mai CP	10	3	
CP 23	23-mai CP sous pression naturelle 0.120	8,5 cm d'eau dans le fond	11	3
CP 24m	24-mai CP Sous pression stabilisée 0.151	12 cm d'eau dans le fond	12	3
CP 24s	24-mai Sous pression 0,268	54,5 cm d'eau dans le fond	13	3
P0.171	28-mai Sous pression stabilisé 0.171	90 cm d'eau	14	3
P0.320 Test 1	28-mai Sous pression entre 0.319 et 0.321	113 cm d'eau	15	1
P0.320	28-mai Sous pression entre 0.322 et	116,5 cm d'eau	15	1

<b>Test 2</b>		0.324			
<b>P0.320</b>	28-mai	Sous pression entre 0.320 et	117 cm d'eau	15	1
<b>Test 2</b>		0.321			
<b>P0.195</b>	30-mai	sous pression 0,195/ Deux	137 cm d'eau	16	3
		capteurs sous l'eau			
<b>Patm</b>	30-mai	Pression	151 cm d'eau	17	3
		atmosphérique			
<b>P0.165</b>	03-juin	P0.165	11 cm d'eau	18	3

Ce tableau reprend toutes les mesures de résistivité effectuées avec le détail de l'état de la colonne au moment de la prise de données. Le Terme CP correspond à la Capacité au Champ. Les noms de fichier quant à eux permettent une identification rapide lors du traitement de données.

### b- L'inversion :

L'inversion est une des étapes primordiales de notre expérience, elle revient à traduire toutes nos données mesurées en modèle de distribution de résistivité électrique. Avant d'inverser les données il faut passer par une étape du traitement, et supprimer les données dont le signal est trop faible ou bruité.

Les quadripôles et séquences créés avant la manipulation étaient basés sur des modèles théoriques, cependant des séquences qui étaient valables numériquement ne le sont peut-être pas en pratique. Ceci est vérifié quand on regarde les valeurs enregistrées.

Une mesure est jugée fiable quand les valeurs d'intensité de mesure  $I$  sont supérieures à 10mA et quand les variations  $\Delta V$  sont supérieures à 20 ou inférieures à -20 mV.

En tout, 88 quadripôles ont été supprimés lors de cette analyse pour toutes les séquences enregistrées.

Pour chaque mesure SYSCAL (sauf lors de la montée en eau par palier) 3 répétitions ont été faites. Les mesures étant de 15 minutes en moyenne, l'idée était de voir si les valeurs bougeaient entre chaque mesure mais aussi savoir si chaque mesure était stable.

A partir des 3 répétitions, une moyenne et un écart type ont été calculés. Pour toutes les valeurs d'écart type sur la moyenne supérieures à 5%, les quadripôles ont été supprimés. Normalement pour des mêmes conditions, les trois répétitions doivent fournir un résultat identique, c'est pour cela que les zones à +5% sont éliminées.

Le test de répétabilité a permis de supprimer 24 quadripôles.

Nous avons au départ 524 quadripôles utilisés pour les mesures SYSCAL, maintenant seulement 412 quadripôles sont jugés acceptables pour l'inversion, soit 112 (88 + 24) quadripôles supprimés.

Après inversion, nous avons récupéré un jeu de données de 42 mesures SYSCAL, des teneurs en eau, des pressions, des températures, des volumes de gaz et la composition du gaz à différents pas de temps  $t$ .

## 5/Le jeu de Données

Nous avons donc 42 jeux de données à notre disposition, sur ces données un autre traitement de bruit est nécessaire. Lors de l'inversion le logiciel peut créer des artefacts qui n'ont pas lieu d'être. Pour extraire ce bruit nous utilisons les jeux de données du 21 et du 22 mai, à saturation et à capacité au champ soit 6 mesures. Ces deux jeux sont choisis car ils correspondent à des instants de mesure où la colonne a déjà été saturée et dé-saturée, c'est-à-dire dans un état hydrique connu et très différencié, mais considéré comme stable durant les répétitions.

Le logiciel BERT, après inversion, renvoie un fichier contenant les valeurs de résistivité calculées, cependant il les renvoie sur une ligne de fichier et non pas ranger pas point de coordonnées. Pour extraire le bruit nous avons donc récupérée cette ligne, l'avons transformée en colonne et ainsi nous avons pu comparer les résultats.

Quand l'écart type était supérieur à 5% nous attribuons une note de 0 à la ligne sinon la note donnée est de 1. La suppression est validée par la multiplication des écarts type calculés, si la valeur est de 0 la ligne est à supprimer.

### Extraction du bruit de l'Inversion

Dans la précédente partie nous parlions de ligne à supprimer pour les mesures Syscal, le logiciel Bert lors de son inversion créer un maillage sur lequel il affecte une valeur de résistivité calculée. Ces lignes sont liées à une propriété de l'inversion et du maillage. Une ligne regroupe les valeurs d'inversion pour un même point de maillage mais pour des mesures différentes. Des détails sur la genèse de ces fichiers sont donnés en Annexe.

A l'origine nous voulions savoir si des lignes ne pouvaient pas être retirées manuellement, quand, sur le logiciel de modélisation, nous jugions que cette zone ne pouvait pas être analysée correctement. Ceci étant impossible nous avons donc choisi de prendre l'analyse par l'écart type pour retirer les zones trop sensible et sujette au bruit.

Travaillant sur 42 fichiers d'inversion avec des résultats à plus de 100 000 valeurs un programme Matlab a été utilisé. Il a récupéré les fichiers du 21 mai et du 22 mai (voir Tableau 9), calculé l'écart type et enregistré dans un fichier retour « Ligne à supprimer » toutes les lignes devant subir une suppression. Ce fichier est appliqué sur les 42 fichiers d'inversion.

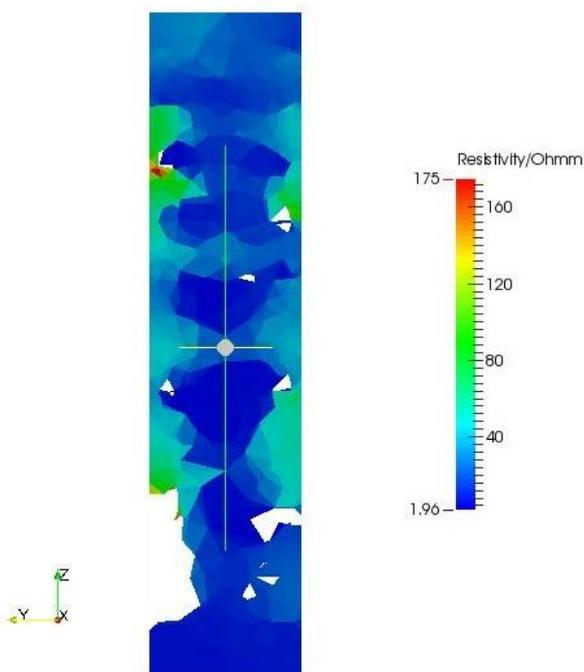


Figure 19: Inversion sans le bruit

Cependant le logiciel Paraview qui permet d'afficher le résultat des inversions ne peut afficher qu'un fichier avec le même nombre de valeurs que ce qu'il y a d'inscrit dans son maillage. Les valeurs n'ont donc pas été supprimées mais remplacé par une valeur de résistivité de 15000 afin de pouvoir être extraite du modèle.

Voici le résultat de l'inversion extraite de tout bruit, il s'agit d'une coupe verticale (YZ) de l'inversion de la

colonne à l'état sec. On voit qu'une grande zone en partie basse de la colonne a été supprimée.

## VI/ Résultats et discussion

### 1/Résultats

Seulement 18 enregistrements sont utilisés pour l'analyse, une pour chaque état du milieu. En effet, les fichiers étant filtrés du bruit, les répétitions contiennent donc une information identique à  $\pm 5\%$ .

La Figure ci-dessous montre une coupe pour chaque mesure SYSCAL :

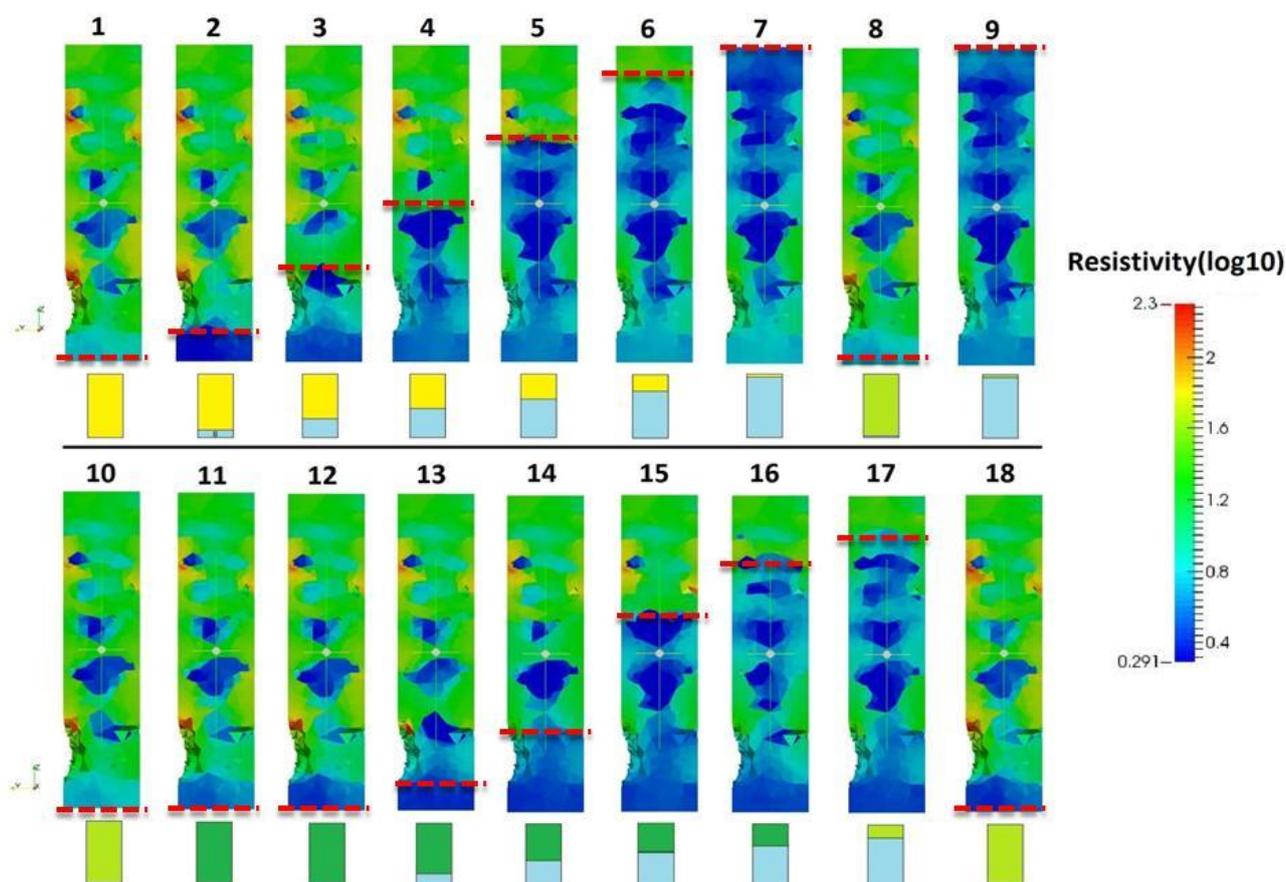


Figure 20: Coupe YZ des inversions sous BERT

De manière brute voici le résultat des inversions, les parties tronquées dans les colonnes correspondent aux zones comportant trop d'incertitude (bruit) et ne pouvant être analysées de manière fiable.

Pour les inversions, les valeurs de RMS sont comprises entre 0.2 et 1.2 et pour le  $\chi^2$  entre 6 et 20. Ces valeurs nous donnent une assurance confortable quant à la validité des résultats d'inversions obtenues.

En première approche, on peut suivre l'évolution de la montée d'eau dans la colonne.

D'un point de vue dynamique les méthodes électriques nous montrent bien la présence de l'eau dans la colonne avec une précision qui sera détaillée dans l'analyse.

### a- Analyse

Avec de tels résultats, plusieurs analyses sont possibles, une analyse en coupe peut permettre un dégrossissage de l'information pour faire apparaître les zones qui nous intéressent. Après une analyse générale, des études ont pu être mises en place. Il ne faut pas oublier que l'objectif principal est de pouvoir observer les variations de résistivité durant la réinjection de lixiviat et également d'évaluer l'éventuel impact d'augmentation de pression de gaz dans le milieu.

#### La première analyse : L'analyse brute

Cette analyse se porte sur la figure 18, comme dit précédemment il ne s'agit que d'une analyse préliminaire sur les résultats.

En première approche, nous pouvons voir que les inversions montrent de manière grossière les variations de saturation entre la montée progressive de l'eau ou les variations entre état sec (1) et à capacité au champ (8 et 10). Avec une échelle commune, les faibles variations pour chaque colonne ne sont pas visibles, par exemple pour une saturation (6 ou 7) la gamme de valeur est entre 38 et 0.5  $\Omega.m$ .

A partir de ces coupes, seules l'hydrodynamisme est identifiable.

En comparant les coupes 1, 7, 8, 9 et 10, on peut faire ressortir l'information due à la teneur en eau. On remarque bien que lorsque la colonne est saturée les valeurs de résistivité sont plus faibles :

Tableau 10: Comparaison Sec-saturation-capacité au champ

Etat	Résistivité min ( $\Omega.m$ )	Résistivité max ( $\Omega.m$ )	Moyenne	Ecart type
Sec (1)	1.1	180.72	33.97	19.64
Saturation (7)	0.54	40.92	7.25	4.25
Capacité au champ (8)	0.76	188.23	26.63	13.39
Saturation (9)	0.63	34.78	6.5	3.41
Capacité au champ (10)	0.64	179.49	24.86	11.81

Nous avons préparé la colonne afin qu'elle soit la plus homogène possible, cependant nous avons vu, lors de l'inversion, à l'état sec, d'importante disparité dans la colonne. Ceci montre que la colonne n'est pas homogène et même montre une forte hétérogénéité en fonction de là où l'on regarde.

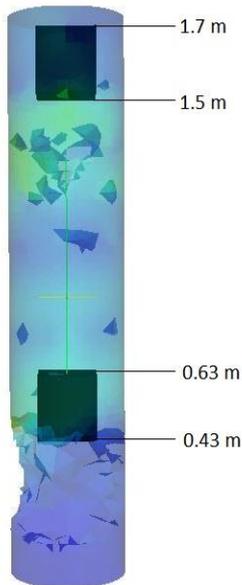
Au vue de ces valeurs on peut voir l'impact de la teneur en eau, diminution des valeurs minimums et maximums, de la moyenne mais aussi de l'écart type. A capacité au champ nous retrouvons des valeurs comprises entre l'état sec et la saturation.

La comparaison des états 17 et 18 permet de mettre en valeur le rôle de la pression sur les valeurs. Comme on peut le voir sur la figure 18, aucun changement n'est visible dans la partie haute de la colonne (entre 1.5 et 1.8m) où seule la pression a été modifiée.

## La seconde analyse : LES CUBES

Pour poursuivre l'analyse, l'idée est de prendre deux cubes de volume identique dans chaque colonne (un en haut et l'autre en bas de la colonne) pour faire ressortir une différence sur la résistivité due à la présence d'eau (en bas) ou du gaz (en haut).

Les cubes sont placés dans des zones où peu de points sont manquants (supprimés par le bruit). Un cube de 20cm de côté est placé entre 1.5 et 1.7m de hauteur, pour essayer de mettre en avant une possible évolution due à la présence de gaz dans cette partie.

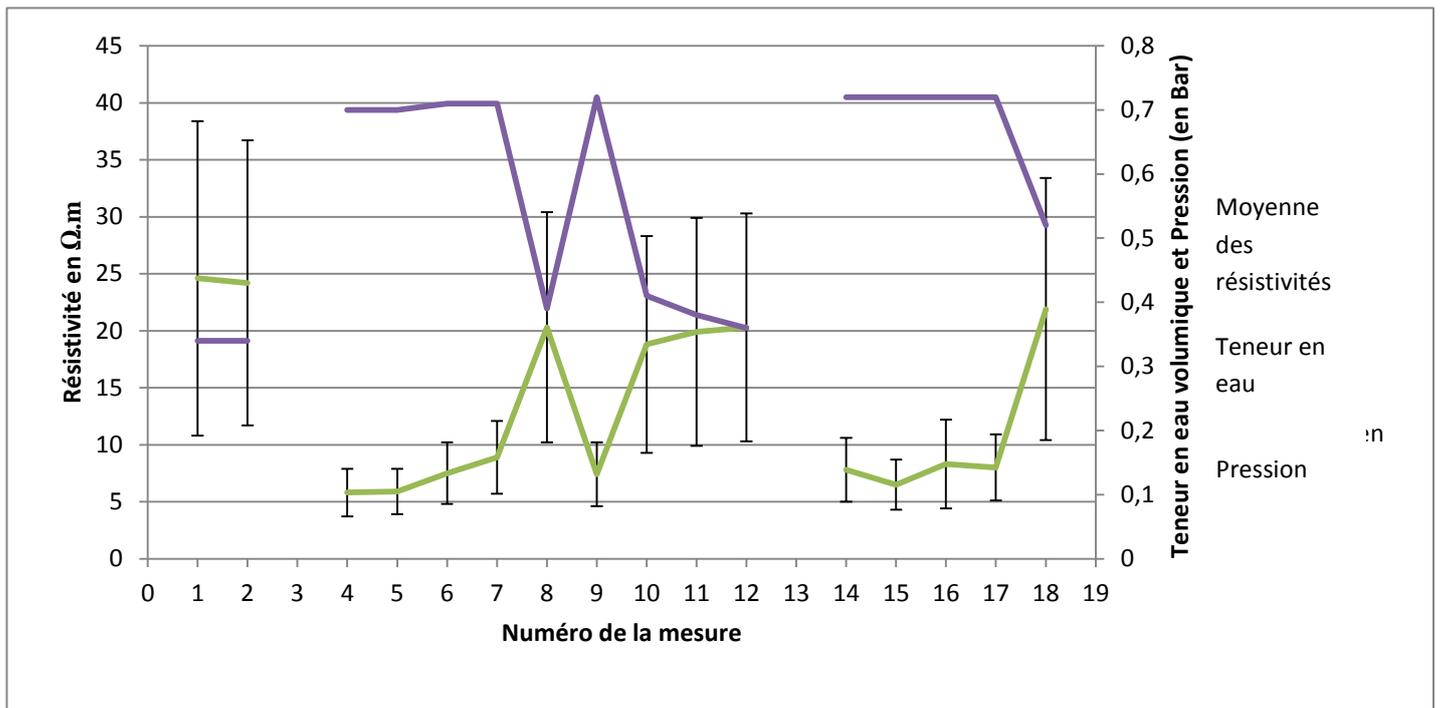


Quant au cube du bas, placé de 0.43 à 0.63 et de même dimension, il a pour but de montrer les variations de résistivité dues au lixiviat. Il est placé aussi haut à cause de la suppression d'une grande partie de donnée dans la partie basse.

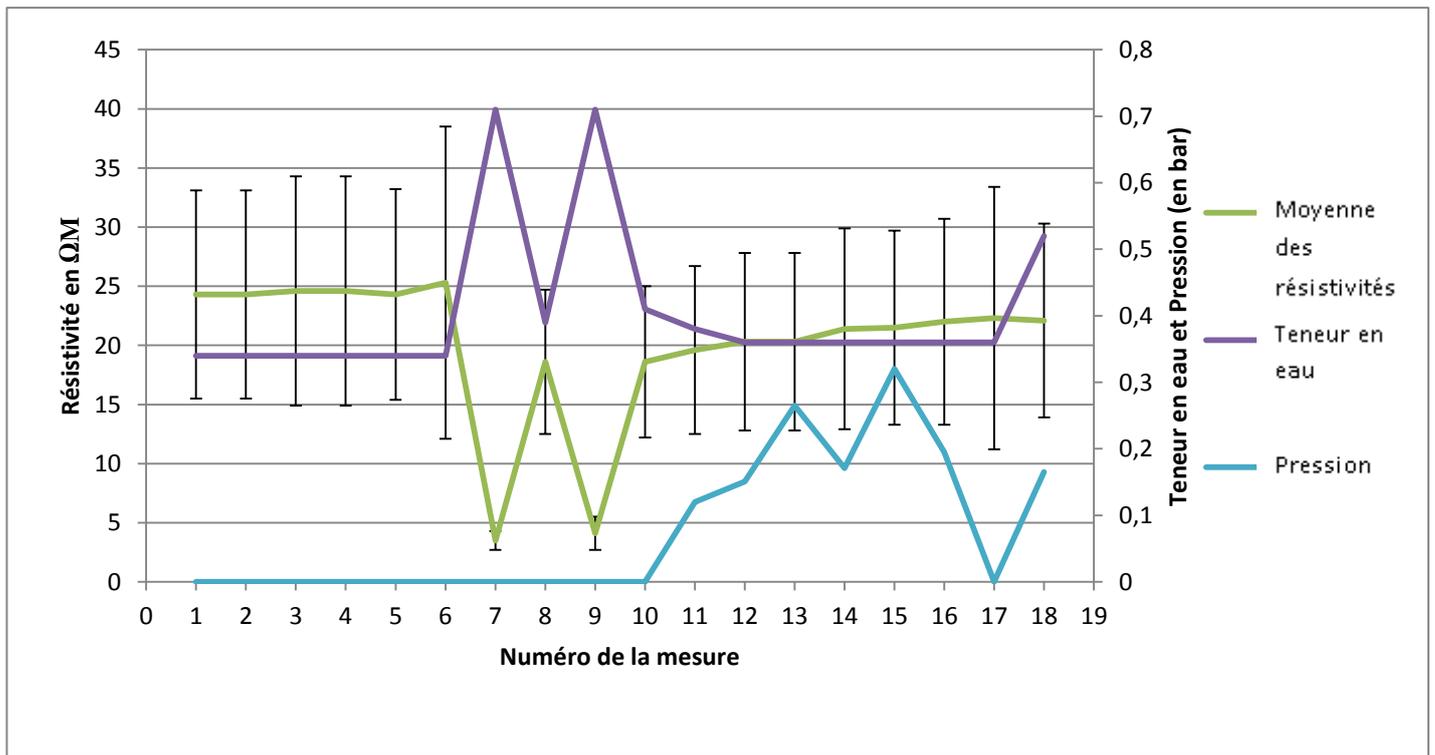
Les cubes permettent de représenter un volume élémentaire de la colonne hors interaction avec les bords inférieurs et supérieurs.

Des graphiques ont été tracés pour représenter l'évolution de la résistivité moyenne (moyenne arithmétique) dans ces cubes en fonction de la pression et de la teneur en eau.

Figure 19: position des cubes d'analyse dans la colonne



Graphique 6: Représentation graphique de l'évolution de la résistivité dans un cube élémentaire de 60cm<sup>3</sup> pour la partie basse de la colonne (0.43 à 0.63)



Graphique 7: Représentation graphique de l'évolution de la résistivité dans un cube élémentaire de 60cm<sup>3</sup> pour la partie haute de la colonne

Tableau 11: valeur de résistivité des Cubes

Numéro de mesures	Bas		Haut		Pression en bar
	Résistivité en Ω.m	Teneur en eau (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Résistivité en Ω.m	Teneur en eau (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	
1	24,5	0,34	24,3	0,34	0
2	24,2	0,34	24,3	0,34	0
3			24,6	0,34	0
4	5,8	0,7	24,6	0,34	0
5	5,9	0,7	24,3	0,34	0
6	7,5	0,71	25,3	0,34	0
7	8,9	0,71	3,5	0,71	0
8	20,3	0,39	18,6	0,39	0
9	7,4	0,72	4,1	0,71	0
10	18,8	0,41	18,6	0,41	0
11	19,9	0,38	19,6	0,38	0,12
12	20,3	0,36	20,3	0,36	0,151
13			20,3	0,36	0,265
14	7,8	0,72	21,4	0,36	0,171
15	6,5	0,72	21,5	0,36	0,32
16	8,3	0,72	22	0,36	0,195
17	8	0,72	22,3	0,36	0
18	21,9	0,52	22,1	0,32	0,165

Les trois figures qui précèdent correspondent aux résultats de l'étude des cubes. Sur le graphique 8 et le tableau 11, les mesures 3 et 13 ne sont pas représentées pour le cube élémentaire du bas car ils étaient à moitié saturé et donc difficilement analysables.

Sur le graphique 8 on peut voir la symétrie parfaite entre la teneur en eau (en violet) et la résistivité moyenne (en vert). Ceci montre un lien entre la présence d'eau dans la colonne et la résistivité du milieu, l'impact de la teneur en eau sur la résistivité globale du milieu est donc indiscutable, sachant que la température est maîtrisée et homogène.

Sur le tableau 11 et sur le graphique 8, on peut aussi voir que lors de la saturation du cube, la résistivité est comprise entre de 5-8 $\Omega$ m. Cela confirme qu'à saturation, l'eau régit la résistivité du milieu.

Les capacités au champ pour le cube bas sont intéressantes à regarder. A l'état sec la résistivité est de 24 $\Omega$ m, après une saturation la valeur est de 20  $\Omega$ m et après la deuxième de 18  $\Omega$ m. Le retour aux valeurs de 20  $\Omega$ m, après, exprime une désaturation continue car plusieurs jours se sont écoulés entre la deuxième saturation et ces valeurs.

Le cube du haut a le même comportement, la valeur retour est de 4-5  $\Omega$ m, la valeur est bien plus basse que pour les saturations en bas de la colonne. Cependant au lieu d'avoir des valeurs de saturation à 5-8 $\Omega$ m ils sont de 4-5 $\Omega$ m. Ceci est difficilement explicable sans plus d'information. On peut émettre comme hypothèse, la plus grande concentration en électrode dans la partie haute que dans la partie basse. Cependant on remarque bien que les valeurs sont semblables en haut et en bas pour les capacités au champ.

Quand on s'attarde sur les valeurs à la capacité aux champs du cube du haut, on peut faire le même commentaire que pour le cube du bas. Les valeurs sont les mêmes pour l'état sec, un peu plus basses pour la première et deuxième saturation (18.6  $\Omega$ m). On remarque que le cube du haut est plus sensible à la présence de lixiviat et la diminution de résistivité est plus forte.

Pour l'analyse de l'impact de la pression de gaz, nous avons essayé de prendre un maximum de données lors des augmentations de pression de la colonne. Au final nous avons 7 mesures de résistivités pour des pressions différentes. Les mesures avec la pression correspondent aux essais 11 à 18 et c'est sur le cube du haut que nous allons analyser d'après le graphique 9.

On part du principe que la teneur en eau est constante durant cette période, on remarque que lors de l'augmentation de pression, de 0 à 0.320mbar (de 10 à 15) la résistivité augmente doucement, de 18.6 à 21.5  $\Omega$ m. Mais, aux mesures 16 et 17, la cellule est dépressurisée et remise à zéro, or on remarque que la valeur de résistivité continue à augmenter (22 et 22.3  $\Omega$ m). Ceci démontre que la pression n'a pas d'effet sur la valeur de résistivité du milieu.

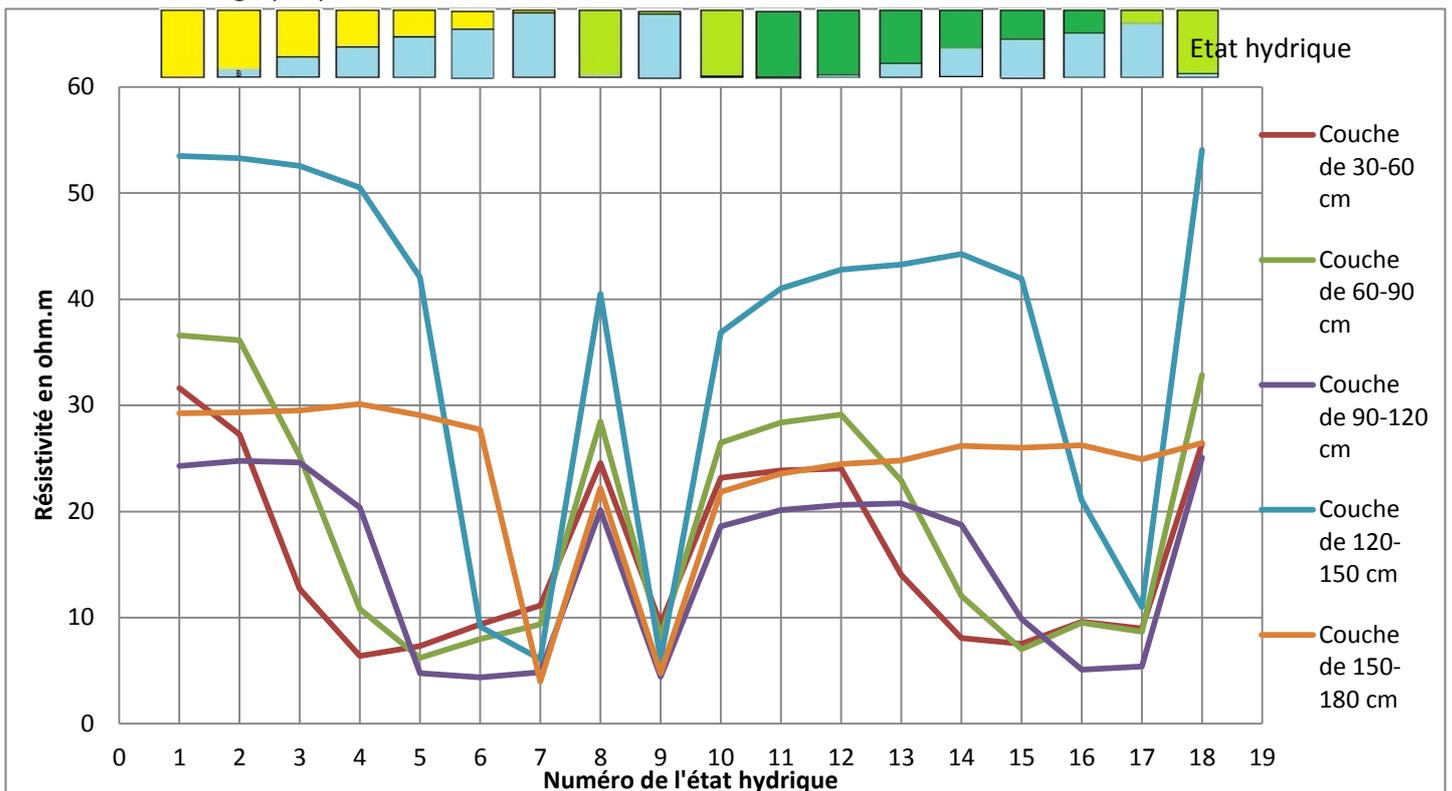
La montée continue en résistivité dans ce cube, s'associe avec la migration, sous l'effet de la gravité, de l'eau vers le bas de la colonne et donc une diminution de la teneur en eau.

Cela nous amène donc au sujet de la connaissance réelle de la teneur en eau dans le milieu, nous ne connaissons que la teneur en eau globale de la colonne, alors que la répartition de l'eau ne semble pas tout à fait homogène. Sachant que la teneur en eau régit principalement (avec la température) la résistivité d'un milieu, la connaissance approximative de cette valeur perturbe nos interprétations, notamment pour les mesures à capacité au champ.

Une étude en cube contraint trop les phénomènes dans la colonne. Nous venons de voir que la colonne n'est pas homogène mais aussi que la répartition de l'eau au sein même de cette colonne est mal définie. Afin de mieux observer ce qui se passe dans la colonne, une étude en tranche est mise en place.

### La Troisième analyse : LES TRANCHES

Cette analyse essaie de faire ressortir les variations de la résistivité en fonction de tranche de 30 cm pour chaque mesure, sans discriminer des parties hautes ou basses. Cette étude nous offre donc le graphique suivant :



Graphique 8: Evolution des moyennes des résistivités par tranche de 30cm en fonction des mesures

Comme on peut le remarquer, sur ce graphique la couche 0-30 a été supprimée. En effet, il a été vu plus haut que la résolution à cette hauteur est de mauvaise qualité et donc elle n'a pas été analysée.

Plusieurs informations ressortent de ce graphique, le premier et le plus visible, la chute de résistivité sous la barre des 10Ωm pour les mesures 7 et 9, qui correspondent à la saturation complète de la colonne. De plus lorsque chaque tranche se retrouve saturée pour n'importe quelle mesure sa valeur de résistivité se retrouve dans une gamme inférieure à 10Ωm. Cette information nous confirme ce qui a été énoncé par l'analyse précédente.

Il est intéressant aussi de voir l'ordre de résistivité des couches, à l'état sec les couches sont organisées : violet, orange, rouge, vert et bleu, ce qui ne correspond pas à un effet gradient. On peut l'associer à un biais, causé par la cellule qui n'est pas réellement homogène. Quand on regarde l'ordre des mesures à la capacité au champ pour les états 8 et 10, il reste le même qu'à l'état sec contrairement à l'état saturé où les résistivités sont mélangées.

On observe aussi que la chute de résistivité pour chaque tranche correspond bien à l'ordre de montée en eau. La première à chuter est la courbe rouge 30-60, puis la verte 60-90, suivis de la violet 90-120, puis de la bleu 120-150 et pour finir la orange 150-180.

Tableau 12: Valeur de résistivité (en  $\Omega\text{m}$ ) par tranche et par état de la colonne

Numéro de mesures	Couche de 0-30 cm	Couche de 30-60 cm	Couche de 60-90 cm	Couche de 90-120 cm	Couche de 120-150 cm	Couche de 150-180 cm	Pression en bar
	Résistivité	Résistivité	Résistivité	Résistivité	Résistivité	Résistivité	
1	9,28	31,61	36,6	24,28	53,5	29,24	0
2	4,22	27,27	36,13	24,76	53,27	29,34	0
3	3,03	12,71	25,21	24,61	52,57	29,52	0
4	3,93	6,39	10,82	20,39	50,52	30,13	0
5	4,36	7,32	6,21	4,78	42,07	29,06	0
6	5,58	9,38	7,97	4,37	9,17	27,71	0
7	6,59	11,15	9,38	4,85	6,1	3,98	0
8	7,41	24,57	28,48	20,13	40,5	22,22	0
9	5,28	9,39	8,13	4,43	6,04	4,77	0
10	7,56	23,17	26,48	18,6	36,87	21,85	0
11	5,89	23,86	28,39	20,13	41	23,55	0,12
12	5,23	24,04	29,13	20,61	42,77	24,48	0,151
13	2,92	14,03	22,91	20,77	43,25	24,81	0,265
14	3,34	8,09	12,06	18,76	44,27	26,18	0,171
15	3,62	7,53	7,03	9,87	41,93	26,01	0,32
16	3,41	9,61	9,52	5,09	21,05	26,23	0,195
17	3,67	8,97	8,67	5,39	10,99	24,92	0
18	5,21	26,39	32,86	25,06	54,05	26,45	0,165

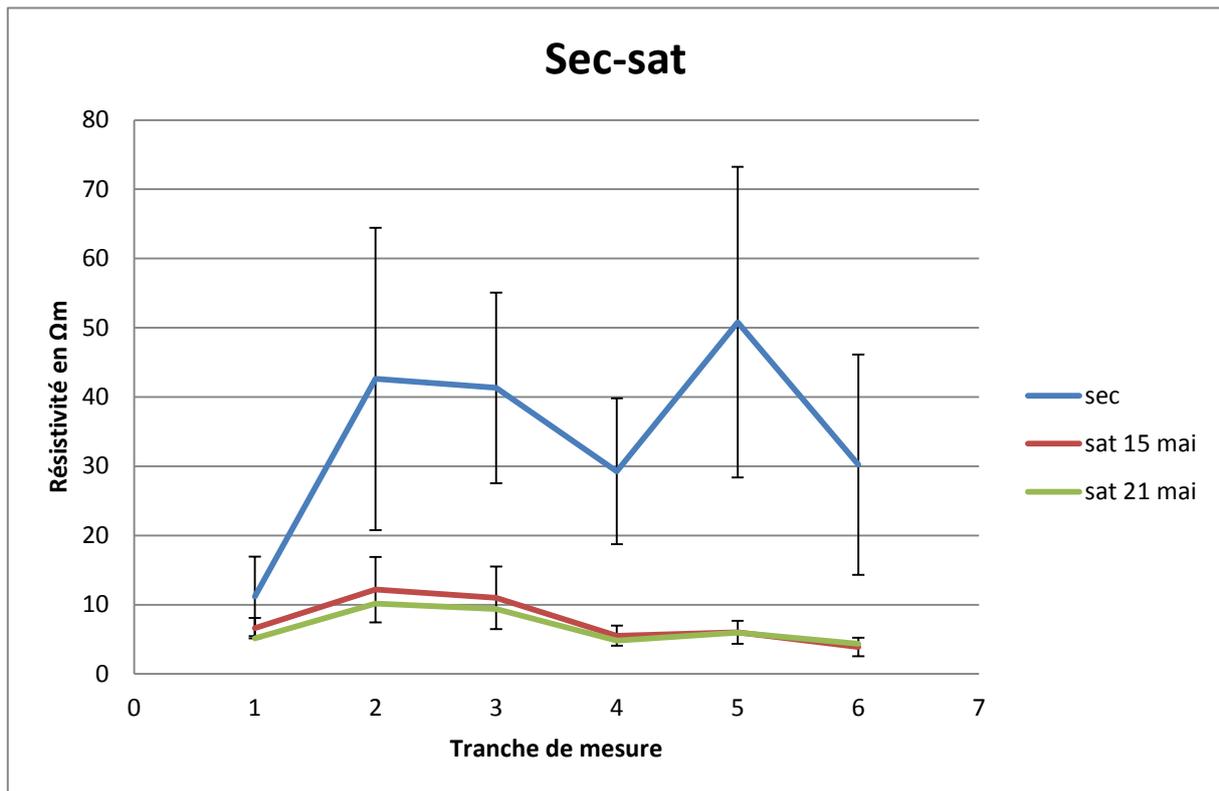
Ce tableau représente la même information que le graphique mais en format numérique, de plus, y est associé les valeurs de pression. Même remarque que pour l'analyse des cubes, lorsque la pression augmente la résistivité ne réagit pas ou peu (monte de 24.48 à 26.45 $\Omega\text{m}$ ), exemple lors du passage à pression atmosphérique (mesure 17) où la valeur perd 1 $\Omega\text{m}$ , ce qui est négligeable. De plus cette chute peu s'explique par un réarrangement des gouttes d'eau au sein de la zone.

La pression n'est visible, d'après mon analyse, que par la migration d'eau. Ce qui n'en fait pas un marqueur pour les variations de résistivité.

#### **L'eau et la résistivité :**

Le graphique 9 a pu confirmer le rapport entre les variations de teneur en eau et de résistivité donnée dans la littérature. Pour poursuivre cette analyse dans le cas d'un déchet ménager non dangereux, une comparaison entre l'état sec (1) et les deux états à saturation (7 et 9) a été tracé sur un graphique en fonction des tranches, graphique 11.

Premièrement on peut voir que les valeurs de résistivité entre l'état saturé et l'état sec sont bien différentes ainsi que la dispersion des valeurs, bien supérieure à l'état sec. On peut une fois de plus affirmer que le milieu n'est pas homogène en voyant les variations de résistivité à l'état sec. La deuxième information vient des résistivités des milieux saturés, leurs valeurs sont presque semblables, à noter que c'est deux mesures ont une teneur en eau identique de  $0.72 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Cette valeur moyenne de résistivité est de  $7.1 \Omega\text{m}$ . A une saturation, pour une teneur en eau de  $0.72 \text{ m}^3/\text{m}^3$  et une résistivité de  $7,1 \Omega\text{m}$  peut y être associée dans les conditions expérimentales des travaux menés.



Graphique 9: Comparaison entre état saturés et sec

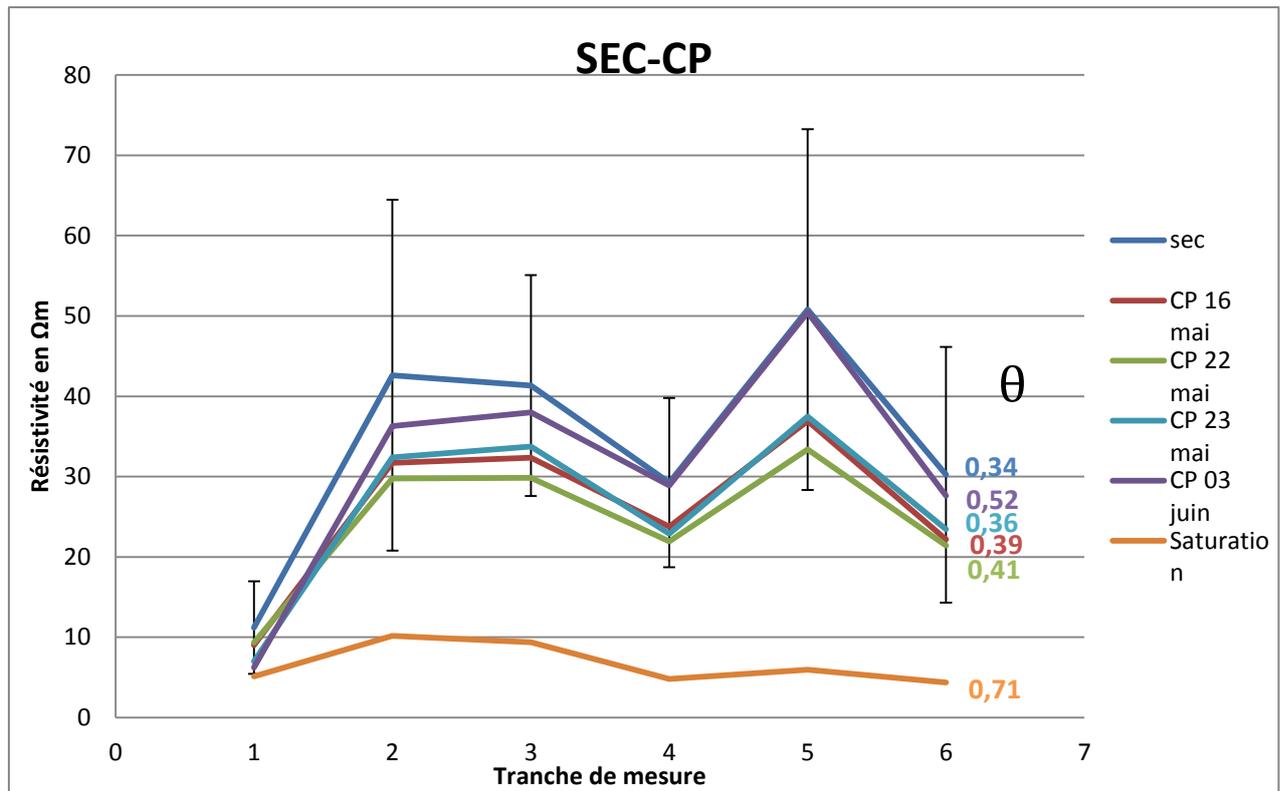
Il est important de noter la forme de la courbe à l'état sec, outre ses grandes oscillations, les valeurs de résistivité augmentent. Cette analyse peut s'expliquer par la densité. Normalement la densité devrait être homogène dans toute la colonne mais lors du remplissage une compaction plus importante a pu s'appliquer sur les tranches sous-jacentes lors de l'ajout des couches supérieures. Il est difficile de démontrer cette hypothèse, un test avec injection d'eau froide et suivi par fibre optique a été mis en place. Ce test n'est pas présenté dans ce rapport mais la conclusion est que la colonne de déchet ne s'est pas tassée.

#### **La pression, la résistivité et la teneur en eau :**

L'impact de la pression est l'information importante que l'on veut faire ressortir de cette étude. On a vu sur le graphique 9 que sous pression la résistivité augmentait de  $2.8 \Omega\text{m}$ , une très faible variation qui pourrait être seulement due à la teneur en eau.

Une comparaison entre l'état sec et les 5 capacités au champ ont été tracées (graphique 12). Il montre l'effet de la teneur en eau sur les valeurs de résistivité. On peut voir à la droite des courbes leurs

valeurs de teneur en eau, outre celle à  $0.52 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , plus la teneur en eau est forte plus la résistivité est faible.



Il y a donc un impact sur la résistivité de la teneur en eau, mais il est à noter la présence de la droite  $0.52 \text{ m}^3/\text{m}^3$ .

La teneur en eau est calculée sur une moyenne de toute la colonne, ce qui ne semble pas réaliste. En effet la colonne contient bien une teneur en eau moyenne de  $0,52 \text{ m}^3/\text{m}^3$  mais pas réparties de manière homogène.

Il faut donc comprendre de cela que la faible variation de pression vu sur le graphique 12 est inhibée voir même créée par la variation de la teneur en eau dans la partie haute de la colonne. Il correspondrait à la dé-saturation de la partie haute de la colonne.

### 3/Autre résultats

Outre les variations de teneur en eau dans la colonne, d'autres paramètres peuvent affecter la résistivité.

#### a- Gaz

Lors de chaque retour à pression atmosphérique des échantillons de gaz ont été récupérés et

Graphique 10: Comparaison de l'état sec et des capacités au champ.

une analyse de composition a été faite. Lors du premier prélèvement, le volume de gaz produit par la colonne a été estimé, par le biais d'un auget à gaz. L'auget a effectué 211 basculements, sachant

qu'un basculement fait 75mL de gaz, le volume produit est de 15,825L. Ce gaz aura été produit pendant une durée d'un mois.

D'autres idées de test ont été pensés mais pas encore effectués dont entre autre sur la qualité du gaz produit, essayé de voir si la composition du gaz peut affecter la résistivité.

Dans notre manipulation, sur 2 mois de mesure le gaz à peu évolué :

**Tableau 13: Composition des prélèvements de gaz en %**

	30 mai	28 juin	3 juillet	8 juillet
<b>O<sub>2</sub></b>	1,51 %	0,54 %	1,26 %	1,51 %
<b>N<sub>2</sub></b>	22,56 %	13,55 %	14,34 %	22,56 %
<b>CH<sub>4</sub></b>	0,91 %	0,19 %	0,08 %	0,91 %
<b>CO<sub>2</sub></b>	58,2 %	85,43 %	84,11 %	58,21 %
<b>H<sub>2</sub></b>	16,81 %	0,3 %	0,21 %	16,81 %

Du 30 mai au 3 juillet la colonne est restée fermée ce qui nous montre une évolution du gaz au cours du temps. La mesure du 8 juillet correspond à un prélèvement 8 jours après la fermeture de la colonne. La composition du 30 mai est identique à celle du 8 juillet, les deux prélèvements ont eu lieu 8 jours après la fermeture de la colonne.

Pour l'évolution du gaz on remarque que la quantité d'oxygène est basse par rapport à l'atmosphère (21 %) ce qui indique une consommation du gaz. La diminution de la concentration en azote montre une forte dilution du milieu et donc une forte production en gaz. Ce qui se valide par la proportion en CO<sub>2</sub> dans la colonne, de 58% à 86% au maximum, alors qu'il n'est présent qu'à 0,04% dans l'atmosphère. La concentration en Hydrogène a aussi diminuée au cours des 3 mesures cependant dans l'atmosphère l'hydrogène est peu présent ce qui indique une production. Le méthane quant à lui n'évolue que très peu voir même diminue, cette diminution sera expliquée dans la partie b-Lixiviats.

D'après la figure 3 dans la partie II-2, nous pouvons nous situer en fin de phase III, avant la méthanogénèse.

## **b- Lixiviats**

L'eau injectée dans la colonne est de l'eau du robinet, elle a une conductivité de 460µS/cm pour un pH de 6,9 et une température de 18°C.

Les mesures de conductivité et de pH sont faites dans le laboratoire d'IRSTEA.

Lors de chaque prélèvement de gaz ou récupération de lixiviat, des mesures de conductivité, de pH et de température ont été effectuées :

**Tableau 14: Conductivité, température et pH du lixiviat**

	Conductivité mS/cm	pH	Température °C
<b>Eau 15 mai</b>	0,46	7,5	18°C

Lixiviat 16 mai	5,29	/	/
Lixiviat 22 mai	5,80	/	/
Lixiviat 03 juin	8,23	5,87	/
Lixiviat 28 juin	10,43	5,84	19,8
Lixiviat 03 juillet	10,31	5,81	22,7
Lixiviat 08 juillet	10,72	5,76	23,9

Les valeurs de conductivité ont augmentées pour atteindre une valeur aux alentours de 10 mS/cm. Il est dit dans la littérature que la conductivité d'une eau est proportionnelle à la quantité de solide (sels minéraux) dissout dans l'eau et suivant la loi suivante :

$$2 \mu\text{S/cm} = 1 \text{ ppm (partie par million),}$$

*Ou 1 ppm = 1 mg/l correspond à la concentration en solide dissous.*

Si on suit cette loi, notre lixiviat se serait chargé de 5,13 ppm en sels minéraux par rapport à l'eau utilisée. Cela confirme bien une hydrolyse du déchet par la présence de l'eau.

On peut aussi remarquer l'augmentation de la température ce qui indique une certaine activité bactérienne, cependant ces valeurs restent basses, en effet au vu du pH l'activité bactérienne est fortement inhibée et principalement celle des bactéries méthanogène. Il a été expliqué dans la partie II-2 que si le pH était inférieur à 6 l'activité bactérienne se retrouvait compromise, et ce qui explique aussi la faible concentration en CH<sub>4</sub>, le milieu ne peut rentrer dans la phase méthanogène.

### c- Pression

La pression est un paramètre qui a été suivis durant toute la manipulation, une fois la colonne étanchée. Les 5 capteurs ont toujours agis de concert ce qui indique une bonne diffusion du gaz au sein de la colonne, ce qui n'empêche pas d'éventuelles poches de gaz de se former. La calibration des capteurs a été confirmé lors des tests, pour le retour à 0 lors de la libération du gaz ou lorsque le niveau d'eau passait au-dessus du capteur. Le fichier retour étant trop volumineux il n'est pas présenté dans ce rapport, il couvre les variations de pression du 24 avril 2013 au 17 juillet 2013 avec un pas de mesure toutes les minutes.

### d- Température

La température a été suivie pour 2 objectifs, essayé de caractériser au mieux les variations de température au sein de la colonne (plutôt qu'avec des sondes de température ponctuelles) et représenter l'éventuelle activité bactérienne du milieu. Les résultats données par cette mesure montre qua la cellule n'est pas montée en température, du fait de l'inhibition des bactéries méthanogènes. La cellule est restée à une température constante de 23°C, presque la même température que la salle de mesure thermostatée.

Une autre utilisation a été trouvée mais pas présentée dans ce rapport, lors de nos analyses il a été vu un effet sur la résistivité dans le milieu sec. On a pu remarquer un gradient croissant de

résistivité entre la couche basse et haute. Ce qui pourrait s'expliquer par un tassement et donc une augmentation de densité dans la partie basse.

L'idée est donc d'utiliser la fibre optique pour confirmer cette hypothèse. La fibre optique est censée être enroulée tous les 30 cm de hauteur dans la colonne et par injection d'eau à 0°C nous pouvons donc associer une hauteur d'eau (lu sur le piézomètre) à une couche de 30cm pour une température de fibre optique autour des 0°C. Le résultat est que le déchet n'a subi aucun effet de tassement.

#### e- Niveau d'eau dans le fond de la colonne

Lors de chaque capacité au champ et au fil des jours, par effet de gravité, de l'eau à percolé vers le fond de la colonne. Cette accumulation d'eau au fond de la colonne donne une information sur la variation de la teneur en eau de la colonne. Cette lame d'eau à atteint des hauteurs plutôt conséquente, jusqu'à 30cm de lame d'eau

Ceci nous ramène donc au problème de teneur en eau dans la colonne mais surtout à l'hétérogénéité de cette teneur. Les mesures à capacité aux champs sont donc assimilables à une teneur en eau mais avec beaucoup de précaution, le temps de réessayage peut être beaucoup plus important que les quelques heures que nous avons attendues entre les différentes mesures.

#### f- Résumé

La grande quantité de paramètre impliquée dans les mesures de résistivité explique la forte complexité dans l'analyse des mesures. La définition de ce que l'on voit sur les inversions peut correspondre à l'effet de plusieurs paramètres et certains phénomènes majeurs peuvent en masquer d'autres.

Dans notre cas d'étude, la teneur en eau est prépondérante sur les variations de résistivité observées. Bien que difficile à mesurer de manière précise, une gamme de valeur a pu nous permettre de calculer une valeur moyenne de résistivité à saturation ( $7\Omega.m$ ).

La variation due au gaz a pu être mise en évidence, la pression n'est pas impliquée dans les variations de résistivité analysées. Avec un temps de mesure où la teneur en eau à faiblement variée, a contrario de la pression qui a fortement oscillée, les valeurs de résistivité n'ont pas été perturbées.

L'activité bactérienne et la production de gaz étaient aussi intéressantes à suivre de manière à connaître l'état de dégradation du milieu et ainsi d'observer un effet potentiel de la matrice sur la résistivité du milieu. Nous avons un milieu fortement acide ce qui empêche les bactéries de se développer et donc limite la dégradation du milieu.

La température quant à elle confirme le manque d'activité bactérienne, elle n'évolue que de 5°C au cours des 3 mois d'expériences.

## VII/ CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

---

De nos jours, la gestion des I.S.D.N.D est devenue un enjeu majeur pour la protection de l'environnement. Les ouvrages de stockage de déchet sont suivis de manière réglementaire mais sans intervention dans la plupart des cas sur l'amélioration de la dégradation du milieu pour le rendre

inerte plus rapidement. La réinjection de lixiviat a pour but d'augmenter la vitesse de dégradation. La gestion de ces réinjections demande une connaissance approfondie des mécanismes hydrodynamiques dans un massif de déchet. Pour cela une approche par méthode électrique est développée et un couplage entre modèles hydrodynamique et géophysique est utilisé.

Des mesures de résistivité sont faites sur des centres de stockage, mais comment être sûr de l'interprétation des résultats. Des modèles et des expériences sont donc réalisés en laboratoire pour aider à l'analyse de ces résultats.

Les données de terrains traités montrent, lors de la réinjection, des zones de forte résistivité. Ces zones sont attribuées à la pression du biogaz ou à un artefact du traitement des données.

Les tests effectués durant le stage ont été menés sur une colonne de déchet, déchet récupéré sur un site de traitement des déchets. Des essais pour différentes conditions hydriques et de pression de gaz sont appliqués sur la colonne et suivi par la méthode de tomographie de résistivité électrique.

La première approche par modélisation consistait à paramétrer et configurer les logiciels d'inversion afin que les données de résistivité interprétée obtenues soit les plus pertinentes. Des tests par paliers et autre inclusion d'objet on permit de proposer une configuration optimisée.

Une fois la colonne remplie de déchet, les mesures ont pu commencer. Une batterie d'essai a été effectuée, remplissage par palier, augmentation de la pression, capacité au champ, le but étant d'offrir le plus grand panel d'information à comparer et à traiter. Des mesures annexes ont aussi été prise comme la pression, la température, la composition du gaz, la teneur en eau, la qualité du lixiviat. Ces mesures servent à analyser et interpréter les résultats.

Au final, les mesures de résistivité interprétées nous ont permis de mettre en avant l'impact majeur de la teneur en eau sur les mesures. Ce qui nous donne la confiance dans l'analyse des données enregistrées sur site industriels. Pour le cas de notre étude nous avons même pu associer une valeur moyenne de résistivité. Dans nos conditions d'étude nous avons pu attribuer une valeur moyenne de  $7\Omega.m$  pour une teneur en eau volumique de  $0.72 m^3/m^3$ .

Pour la capacité au champ, la définition d'une valeur moyenne est plus compliquée. A l'état sec, la distribution de résistivité électrique dans la cellule n'est pas homogène et cela se retrouve dans les distributions observées à capacité au champ. De plus, la valeur de teneur en eau à capacité au champ évolue aux cours du temps. Il a été intéressant de noter que pour les états secs et à capacité au champ, la distribution de la résistivité électrique est influencée par les caractéristiques physiques du milieu (porosité et densité) contrairement à l'état saturé où la phase liquide conduit essentiellement les mesures électriques.

En ce qui concerne le gaz, s'il a vraiment un effet, il est inhibé par l'action de la teneur en eau. Toutefois une pression de 0.320 bars, pression largement hors des gammes de valeur possible sur un centre de stockage, a été atteinte et aucune variation de résistivité n'a pu lui être attribuée. Cette analyse confirme que l'augmentation de la pression de biogaz ne peut être visible par mesure de résistivité, bien que son mouvement peut potentiellement être induit par des écoulements de lixiviat.

Les expérimentations en laboratoire ont pour but d'aider à la compréhension des mesures de terrain. L'amélioration des technologies de mesure de la teneur en eau pourraient permettre de mieux appréhender l'évolution dans la colonne.

Pour continuer dans la lancée des tests menés, d'autres expériences ont été pensées. Par exemple, confirmer la variation de densité grâce à la température, des mesure de résistivité après un long moment de désaturation puis à re-saturation dans un court délai, mettre la colonne en production de méthane par injection de solution tampon et regarder l'impact de la composition du biogaz sur les mesure mais aussi d'autre technique d'analyse comme des ratios entre les temps de mesures, des analyses entres les valeurs de résistivité apparentes.

Une multitude d'essai est faisable depuis cette colonne pour apporter un soutien aux analyses de terrain, cependant la représentativité du milieu de taille beaucoup plus faible et de composition définie est souvent un frein à l'extrapolation des travaux de laboratoire.

Le résultat final est donc que la pression de biogaz n'est pas détectable par les méthodes de résistivité électrique.

# ANNEXES

---

## Données du DTS

Voici un fichier brut de retour de mesure par le DTS :

DTS Sentinel unit serial number: SN409014  
Multiplexer serial number: ORYX  
Hardware model number: OX4-SR  
Software version number: ORYX F/W v3.00 Oryx Data Collector v3.7.2.0  
data status ok  
installation voie 1 11  
differential loss correction single-ended  
forward channel 11  
reverse channel N/A  
date 2013/05/15  
time 15:47:40  
forward acquisition time 30.00  
reverse acquisition time 0.00  
gamma 500.4825  
k internal 0.3161  
k external 0.3161  
temperature offset calibration 1.0010  
default loss term (dB/km) 0.3790  
temperature slope calibration 1.1000  
multiplexer offset coefficient 1.0000  
multiplexer slope coefficient 1.0000  
fibre end 0.00  
T internal ref (°C) 20.78  
T ext. ref 1 (°C) 1258.77  
T ext. ref 2 (°C) 1258.77  
length (m) temperature (°C) Stokes anti-Stokes  
0.756 21.883 1899.477 1100.626  
1.771 20.822 1729.701 996.036  
2.786 19.645 1675.164 957.956  
3.800 19.789 1664.167 952.378  
4.815 19.846 1658.565 949.393  
5.829 19.868 1652.559 945.983  
6.844 19.827 1648.075 943.098  
7.859 20.104 1643.934 942.160  
8.873 20.174 1636.531 938.207  
9.888 20.113 1626.523 932.049  
10.902 20.165 1620.066 928.539  
11.917 20.275 1616.251 926.853

12.931	20.280	1614.883	926.008
13.946	20.259	1613.217	924.848
14.961	20.280	1611.858	924.092
15.975	20.461	1608.276	922.917
16.990	20.228	1605.327	919.891
18.004	20.330	1604.395	919.812
19.019	20.251	1602.568	918.251
20.034	20.214	1602.268	917.792
21.048	20.332	1595.702	914.573
22.063	20.613	1567.300	899.669
23.077	20.534	1542.522	884.956
24.092	20.703	1537.152	882.655
25.107	20.486	1536.316	880.981
26.121	20.574	1534.594	880.354
27.136	20.570	1534.602	880.251
28.150	20.639	1534.058	880.209
29.165	20.669	1531.942	879.061
30.180	20.636	1528.868	877.045
31.194	20.345	1526.577	874.165
32.209	20.107	1524.728	871.815
33.223	20.128	1524.427	871.663
34.238	20.285	1522.491	871.269
35.253	20.240	1521.869	870.599
36.267	20.141	1521.059	869.552
37.282	20.349	1519.425	869.580
38.296	20.121	1515.057	865.851
39.311	19.963	1510.202	862.197
40.326	20.015	1508.452	861.375
41.340	19.941	1508.218	860.788
42.355	19.910	1507.814	860.315
43.369	19.922	1506.309	859.433
44.384	19.878	1505.664	858.763
45.399	20.003	1503.817	858.249
46.413	19.835	1499.674	854.964
47.428	19.746	1496.092	852.396
48.442	19.668	1495.849	851.790
49.457	19.746	1495.012	851.618
50.472	19.928	1490.419	849.819

## Les quadripôles

#	Spa1	Spa2	Spa3	Spa4
1	1	2	3	4
2	1	2	4	5
3	1	2	5	6
4	1	2	13	14
5	1	2	21	22
6	1	3	4	5
7	1	3	4	6
8	1	3	4	7
9	1	3	5	7
10	1	4	5	6
11	1	9	5	13
12	1	9	13	21
13	1	9	17	25
14	1	9	17	33
15	1	9	21	29
16	2	3	4	5
17	2	3	5	6
18	2	3	6	7
19	2	3	14	15
20	2	3	22	23
21	2	4	5	6
22	2	4	5	7
23	2	4	5	8
24	2	4	6	8
25	2	5	6	7
26	2	10	6	14
27	2	10	14	22
28	2	10	18	26
29	2	10	18	34
30	2	10	22	30
31	3	4	5	6
32	3	4	6	7
33	3	4	7	8
34	3	4	15	16
35	3	4	23	24
36	3	5	6	1
37	3	5	6	7
38	3	5	6	8
39	3	5	7	1
40	3	6	7	8
41	3	11	7	15
42	3	11	15	23
43	3	11	19	27

44	3	11	19	35
45	3	11	23	31
46	4	5	6	7
47	4	5	7	8
48	4	5	8	1
49	4	5	16	9
50	4	5	24	17
51	4	6	7	1
52	4	6	7	2
53	4	6	7	8
54	4	6	8	2
55	4	7	8	1
56	4	12	8	16
57	4	12	16	24
58	4	12	20	28
59	4	12	20	36
60	4	12	24	32
61	5	6	1	2
62	5	6	7	8
63	5	6	8	1
64	5	6	9	10
65	5	6	17	18
66	5	7	1	3
67	5	7	8	1
68	5	7	8	2
69	5	7	8	3
70	5	8	1	2
71	5	13	9	17
72	5	13	17	25
73	5	13	21	29
74	5	13	21	37
75	6	1	2	3
76	6	7	1	2
77	6	7	2	3
78	6	7	8	1
79	6	7	10	11
80	6	7	18	19
81	6	8	1	2
82	6	8	1	3
83	6	8	1	4
84	6	8	2	4
85	6	14	10	18
86	6	14	18	26
87	6	14	22	30
88	6	14	22	38

89	7	1	2	3
90	7	1	2	4
91	7	1	2	5
92	7	1	3	5
93	7	2	3	4
94	7	8	1	2
95	7	8	2	3
96	7	8	3	4
97	7	8	11	12
98	7	8	19	20
99	7	15	11	19
100	7	15	19	27
101	7	15	23	31
102	7	15	23	39
103	8	1	2	3
104	8	1	3	4
105	8	1	4	5
106	8	1	12	13
107	8	1	20	21
108	8	2	3	4
109	8	2	3	5
110	8	2	3	6
111	8	2	4	6
112	8	3	4	5
113	8	16	12	20
114	8	16	20	28
115	8	16	24	32
116	8	16	24	40
117	9	10	11	12
118	9	10	12	13
119	9	10	13	14
120	9	10	21	22
121	9	10	29	30
122	9	11	12	13
123	9	11	12	14
124	9	11	12	15
125	9	11	13	15
126	9	12	13	14
127	9	17	13	21
128	9	17	21	29
129	9	17	25	33
130	9	17	29	37
131	10	11	12	13
132	10	11	13	14
133	10	11	14	15

134	10	11	22	23
135	10	11	30	31
136	10	12	13	14
137	10	12	13	15
138	10	12	13	16
139	10	12	14	16
140	10	13	14	15
141	10	18	14	22
142	10	18	22	30
143	10	18	26	34
144	10	18	30	38
145	11	12	13	14
146	11	12	14	15
147	11	12	15	16
148	11	12	23	24
149	11	12	31	32
150	11	13	14	9
151	11	13	14	15
152	11	13	14	16
153	11	13	15	9
154	11	14	15	16
155	11	19	15	23
156	11	19	23	31
157	11	19	27	35
158	11	19	31	39
159	12	13	14	15
160	12	13	15	16
161	12	13	16	9
162	12	13	24	17
163	12	13	32	25
164	12	14	15	9
165	12	14	15	10
166	12	14	15	16
167	12	14	16	10
168	12	15	16	9
169	12	20	16	24
170	12	20	24	32
171	12	20	28	36
172	12	20	32	40
173	13	14	9	10
174	13	14	15	16
175	13	14	16	9
176	13	14	17	18
177	13	14	25	26
178	13	15	9	11

179	13	15	16	9
180	13	15	16	10
181	13	15	16	11
182	13	16	9	10
183	13	21	17	25
184	13	21	25	33
185	13	21	29	37
186	14	9	10	11
187	14	15	9	10
188	14	15	10	11
189	14	15	16	9
190	14	15	18	19
191	14	15	26	27
192	14	16	9	10
193	14	16	9	11
194	14	16	9	12
195	14	16	10	12
196	14	22	18	26
197	14	22	26	34
198	14	22	30	38
199	15	9	10	11
200	15	9	10	12
201	15	9	10	13
202	15	9	11	13
203	15	10	11	12
204	15	16	9	10
205	15	16	10	11
206	15	16	11	12
207	15	16	19	20
208	15	16	27	28
209	15	23	19	27
210	15	23	27	35
211	15	23	31	39
212	16	9	10	11
213	16	9	11	12
214	16	9	12	13
215	16	9	20	21
216	16	9	28	29
217	16	10	11	12
218	16	10	11	13
219	16	10	11	14
220	16	10	12	14
221	16	11	12	13
222	16	24	20	28
223	16	24	28	36

224	16	24	32	40
225	17	18	19	20
226	17	18	20	21
227	17	18	21	22
228	17	18	29	30
229	17	18	37	38
230	17	19	20	21
231	17	19	20	22
232	17	19	20	23
233	17	19	21	23
234	17	20	21	22
235	17	25	21	29
236	17	25	29	37
237	18	19	20	21
238	18	19	21	22
239	18	19	22	23
240	18	19	30	31
241	18	19	38	39
242	18	20	21	22
243	18	20	21	23
244	18	20	21	24
245	18	20	22	24
246	18	21	22	23
247	18	26	22	30
248	18	26	30	38
249	19	20	21	22
250	19	20	22	23
251	19	20	23	24
252	19	20	31	32
253	19	20	39	40
254	19	21	22	17
255	19	21	22	23
256	19	21	22	24
257	19	21	23	17
258	19	22	23	24
259	19	27	23	31
260	19	27	31	39
261	20	21	22	23
262	20	21	23	24
263	20	21	24	17
264	20	21	32	25
265	20	21	40	33
266	20	22	23	17
267	20	22	23	18
268	20	22	23	24

269	20	22	24	18
270	20	23	24	17
271	20	28	24	32
272	20	28	32	40
273	21	22	17	18
274	21	22	23	24
275	21	22	24	17
276	21	22	25	26
277	21	22	33	34
278	21	23	17	19
279	21	23	24	17
280	21	23	24	18
281	21	23	24	19
282	21	24	17	18
283	21	29	25	33
284	22	17	18	19
285	22	23	17	18
286	22	23	18	19
287	22	23	24	17
288	22	23	26	27
289	22	23	34	35
290	22	24	17	18
291	22	24	17	19
292	22	24	17	20
293	22	24	18	20
294	22	30	26	34
295	23	17	18	19
296	23	17	18	20
297	23	17	18	21
298	23	17	19	21
299	23	18	19	20
300	23	24	17	18
301	23	24	18	19
302	23	24	19	20
303	23	24	27	28
304	23	24	35	36
305	23	31	27	35
306	24	17	18	19
307	24	17	19	20
308	24	17	20	21
309	24	17	28	29
310	24	17	36	37
311	24	18	19	20
312	24	18	19	21
313	24	18	19	22

314	24	18	20	22
315	24	19	20	21
316	24	32	28	36
317	25	26	27	28
318	25	26	28	29
319	25	26	29	30
320	25	26	37	38
321	25	27	28	29
322	25	27	28	30
323	25	27	28	31
324	25	27	29	31
325	25	28	29	30
326	25	33	29	37
327	26	27	28	29
328	26	27	29	30
329	26	27	30	31
330	26	27	38	39
331	26	28	29	30
332	26	28	29	31
333	26	28	29	32
334	26	28	30	32
335	26	29	30	31
336	26	34	30	38
337	27	28	29	30
338	27	28	30	31
339	27	28	31	32
340	27	28	39	40
341	27	29	30	25
342	27	29	30	31
343	27	29	30	32
344	27	29	31	25
345	27	30	31	32
346	27	35	31	39
347	28	26	32	40
348	28	29	30	31
349	28	29	31	32
350	28	29	32	25
351	28	29	40	33
352	28	30	31	25
353	28	30	31	26
354	28	30	31	32
355	28	30	32	26
356	28	31	32	25
357	29	30	25	26
358	29	30	31	32

359	29	30	32	25
360	29	30	33	34
361	29	31	25	27
362	29	31	32	25
363	29	31	32	26
364	29	31	32	27
365	29	32	25	26
366	30	25	26	27
367	30	31	25	26
368	30	31	26	27
369	30	31	32	25
370	30	31	34	35
371	30	32	25	26
372	30	32	25	27
373	30	32	25	28
374	30	32	26	28
375	31	25	26	27
376	31	25	26	28
377	31	25	26	29
378	31	25	27	29
379	31	26	27	28
380	31	32	25	26
381	31	32	26	27
382	31	32	27	28
383	31	32	35	36
384	32	25	26	27
385	32	25	27	28
386	32	25	28	29
387	32	25	36	37
388	32	26	27	28
389	32	26	27	29
390	32	26	27	30
391	32	26	28	30
392	32	27	28	29
393	33	25	17	1
394	33	25	17	9
395	33	34	35	36
396	33	34	36	37
397	33	34	37	38
398	33	35	36	37
399	33	35	36	38
400	33	35	36	39
401	33	35	37	39
402	33	35	51	52
403	33	35	55	56

404	33	36	37	38
405	33	49	37	51
406	33	49	51	55
407	33	49	53	57
408	33	49	55	59
409	33	57	49	53
410	34	26	18	2
411	34	26	18	10
412	34	35	36	37
413	34	35	37	38
414	34	35	38	39
415	34	36	37	38
416	34	36	37	39
417	34	36	37	40
418	34	36	38	40
419	34	37	38	39
420	35	27	19	3
421	35	27	19	11
422	35	36	37	38
423	35	36	38	39
424	35	36	39	40
425	35	37	38	33
426	35	37	38	39
427	35	37	38	40
428	35	37	39	33
429	35	37	49	52
430	35	37	53	56
431	35	38	39	40
432	35	50	39	52
433	35	50	52	56
434	35	50	54	58
435	35	50	56	60
436	35	58	50	54
437	36	28	20	4
438	36	28	20	12
439	36	37	38	39
440	36	37	39	40
441	36	37	40	33
442	36	38	39	33
443	36	38	39	34
444	36	38	39	40
445	36	38	40	34
446	36	39	40	33
447	37	29	21	5
448	37	29	21	13

449	37	38	33	34
450	37	38	39	40
451	37	38	40	33
452	37	39	33	35
453	37	39	40	33
454	37	39	40	34
455	37	39	40	35
456	37	39	49	50
457	37	39	53	54
458	37	40	33	34
459	37	51	49	53
460	37	51	53	57
461	37	51	55	59
462	37	59	51	55
463	38	30	22	6
464	38	30	22	14
465	38	33	34	35
466	38	39	33	34
467	38	39	34	35
468	38	39	40	33
469	38	40	33	34
470	38	40	33	35
471	38	40	33	36
472	38	40	34	36
473	39	31	23	7
474	39	31	23	15
475	39	33	34	35
476	39	33	34	36
477	39	33	34	37
478	39	33	35	37
479	39	33	50	51
480	39	33	54	55
481	39	34	35	36
482	39	40	33	34
483	39	40	34	35
484	39	40	35	36
485	39	52	50	54
486	39	52	54	58
487	39	52	56	60
488	39	60	52	56
489	40	32	24	8
490	40	32	24	16
491	40	33	34	35
492	40	33	35	36
493	40	33	36	37

494	40	34	35	36
495	40	34	35	37
496	40	34	35	38
497	40	34	36	38
498	40	35	36	37
499	49	50	51	52
500	49	50	55	56
501	49	53	51	55
502	49	53	55	59
503	50	51	52	49
504	50	51	53	56
505	50	54	52	56
506	50	54	56	60
507	51	52	53	54
508	51	55	53	57
509	52	49	54	55
510	52	56	54	58
511	53	54	55	56
512	53	54	59	60
513	53	57	55	59
514	54	55	56	53
515	54	55	57	59
516	54	58	56	60
517	55	56	57	58
518	56	53	58	59
519	57	53	49	33
520	57	58	59	60
521	58	54	50	35
522	58	59	60	57
523	59	55	51	37
524	60	56	52	39

### Les coordonnées des électrodes sur la colonne

numéro électrode	X (en m)	Y (en m)	Z (en m)
1	0.19625	0	1.656
2	0.13600956	0.14147601	1.652
3	-0.00573041	0.19616632	1.645
4	-0.1433551	0.13402753	1.65
5	-0.19619927	-0.00446206	1.648
6	-0.13567581	-0.14179611	1.653
7	0.0091903	-0.19603469	1.646
8	0.14161016	-0.13586989	1.655

9	0.19625	0	1.499
10	0.13744427	0.1400826	1.498
11	-0.003731	0.19621453	1.499
12	-0.1426703	0.13475626	1.4995
13	-0.19619927	-0.00446206	1.5
14	-0.13349246	-0.14385348	1.5005
15	0.00819128	-0.19607898	1.502
16	0.14298744	-0.1344197	1.5
17	0.19624745	0.001	1.351
18	0.13744427	0.1400826	1.348
19	-0.00273113	0.196231	1.343
20	-0.14198179	0.13548149	1.349
21	-0.19624455	-0.00146243	1.346
22	-0.13458807	-0.14282897	1.35
23	0.00619263	-0.19615227	1.351
24	0.14502548	-0.13221828	1.353
25	0.19623981	0.00199997	1.198
26	0.13815628	0.13938043	1.2015
27	0.00026878	0.19624982	1.198
28	-0.13989423	0.13763599	1.197
29	-0.19621946	-0.00346226	1.2005
30	-0.13567581	-0.14179611	1.2
31	0.00819128	-0.19607898	1.2025
32	0.14230065	-0.13514655	1.202
33	0.19622707	0.00299988	1.051
34	0.1388647	0.13867465	1.048
35	0.00226873	0.19623689	1.045
36	-0.13706005	0.14045856	1.047
37	-0.19624946	-0.00046244	1.043
38	-0.1371138	-0.14040608	1.05
39	0.00519306	-0.19618128	1.051
40	0.14230065	-0.13514655	1.0505
49	0.19624745	0.001	0.75725
50	-0.0067299	0.19613457	0.757
51	-0.19614361	-0.00646127	0.757
52	-0.00323107	-0.1962234	0.7555
53	0.19625	0,0000	0.453
54	-0.00822881	0.19607741	0.456
55	-0.19615943	-0.00596152	0.458
56	-0.0017312	-0.19624236	0.455
57	0.19625	0,0000	0.153
58	-0.00922782	0.19603293	0.156
59	-0.19617398	-0.00546174	0.157
60	0.00026878	-0.19624982	0.155

## Résistivité par tranche (en $\Omega\text{m}$ )

	Couche de 0-30 cm		Couche de 30-60 cm		Couche de 60-90 cm		Pression
	Moyenne des résistivités	EC	Moyenne des résistivités	EC	Moyenne des résistivités	EC	
<b>1</b>	9,28	4,85	31,61	18,28	36,6	15,91	0
<b>2</b>	4,22	2,73	27,27	17,75	36,13	13,96	0
<b>3</b>	3,03	0,62	12,71	10,34	25,21	8,33	0
<b>4</b>	3,93	0,66	6,39	2,12	10,82	2,77	0
<b>5</b>	4,36	0,75	7,32	2,75	6,21	2,91	0
<b>6</b>	5,58	1,07	9,38	3,35	7,97	3,76	0
<b>7</b>	6,59	1,31	11,15	3,94	9,38	4,53	0
<b>8</b>	7,41	3,21	24,57	13,33	28,48	11,57	0
<b>9</b>	5,28	1,08	9,39	3,58	8,13	4	0
<b>10</b>	7,56	3,19	23,17	12,29	26,48	10,83	0
<b>11</b>	5,89	3,07	23,86	13,58	28,39	11,51	0,12
<b>12</b>	5,23	3,23	24,04	13,78	29,13	11,66	0,151
<b>13</b>	2,92	0,67	14,03	11,31	22,91	7,63	0,265
<b>14</b>	3,34	0,71	8,09	3,48	12,06	2,89	0,171
<b>15</b>	3,62	0,71	7,53	3,11	7,03	2,87	0,32
<b>16</b>	3,41	0,77	9,61	5,49	9,52	5,51	0,195
<b>17</b>	3,67	0,9	8,97	3,86	8,67	3,54	0
<b>18</b>	5,21	3,39	26,39	16,13	32,86	13,14	0,165

## Paramètre d'inversion F3D\_Lab

Les modèles générés par F3D\_Lab suivent les paramètres suivant :

Tableau 15:Paramètre F3D\_Lab

Fonction	Valeur	Unité
Séquence	position-electrode-benoit-réelle	.XYZ
Quadripôle	Quadripole_benoit_2013_F3D	.txt
Radius	196,25	mm
Height	1740	mm
Resistivity	20	$\Omega\text{.m}$
Ampere	1	A
Mesh	Finer	
Electrode	8	mm
Electrode depth	0,03	m

## Distribution des lignes de courants

Dans la partie IV-5 nous avons vu que l'inversion représentait une zone de forte résistivité juste au-dessus du niveau de séparation entre les 2 et 20Ω.m. Des tests sur Comsol ont donc été effectués pour résoudre, si possible, ce phénomène.

Sur l'inversion, la zone de forte résistivité était située à 1.3m, sur les *Figures 19 et 20* on distingue des informations à ce même niveau.

La figure 19 représente, par tranche, les variations de résistivité. La partie bleu correspond a des valeurs de courant positive, rouge négative et en vert pale des valeurs autour de zéro.

On remarque des  $\Delta V$  proches de 0 sur les tranches 2 et 3 (la 1 étant la tranche du haut) c'est-à-dire entre 1.2 et 1.4m. Ce qui correspond à la position de l'artefact sur nos mesures d'inversion.

Sur la *Figure 20* sont représentées les lignes de courant principal dans la colonne. On peut voir une distorsion de ces lignes au niveau 1.3.

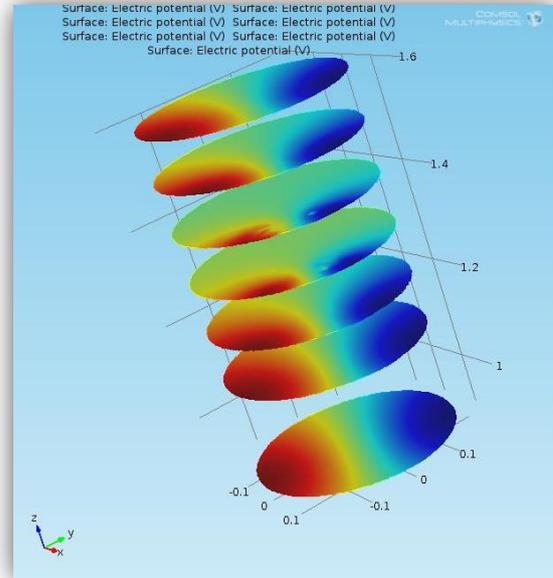


Figure 21:Tranche de résistivité dans la colonne

Ce secteur contient moins de lignes de courant et c'est ce manque qui est traduit par BERT par une zone de résistivité. Ceci est dû au fait que nous sommes proches de l'interface qui a un fort gradient, les lignes de courant ont tendance à être plus attirées dans la zone conductrice ce qui créer un vide et qui est traduit par une zone de résistivité.

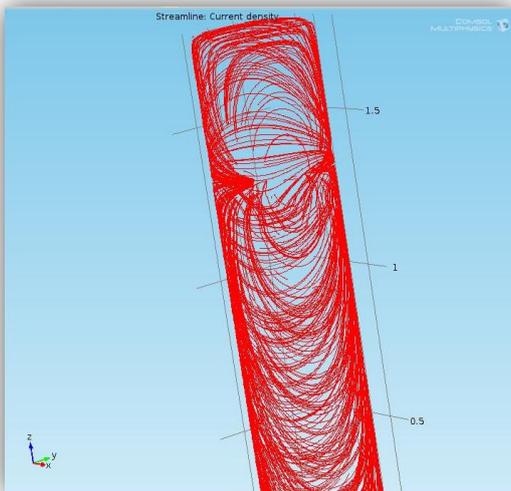


Figure 22:Lignes de courant dans la colonne

Ce problème ne peut pas être résolu mais peut être minimisé et pris en compte dans l'analyse.

## Genèse du maillage BERT

La genèse du maillage nous intéressait pour connaître le fonctionnement de BERT. Le fonctionnement nous permettait de mettre en relief l'inversion et de comprendre les possibles erreurs dues à cette même inversion, problème de calcul mais surtout problème liés aux électrodes ou aux quadripôles.

Dans le fichier final d'inversion le logiciel nous rend une suite de donnée avec les valeurs de résistivité par point du maillage. Cependant la position des points et des valeurs de résistivité ne suivent pas un schéma logique. Les points sont placés de manière empirique par le logiciel, exemple pour la génération des 218 premiers points :

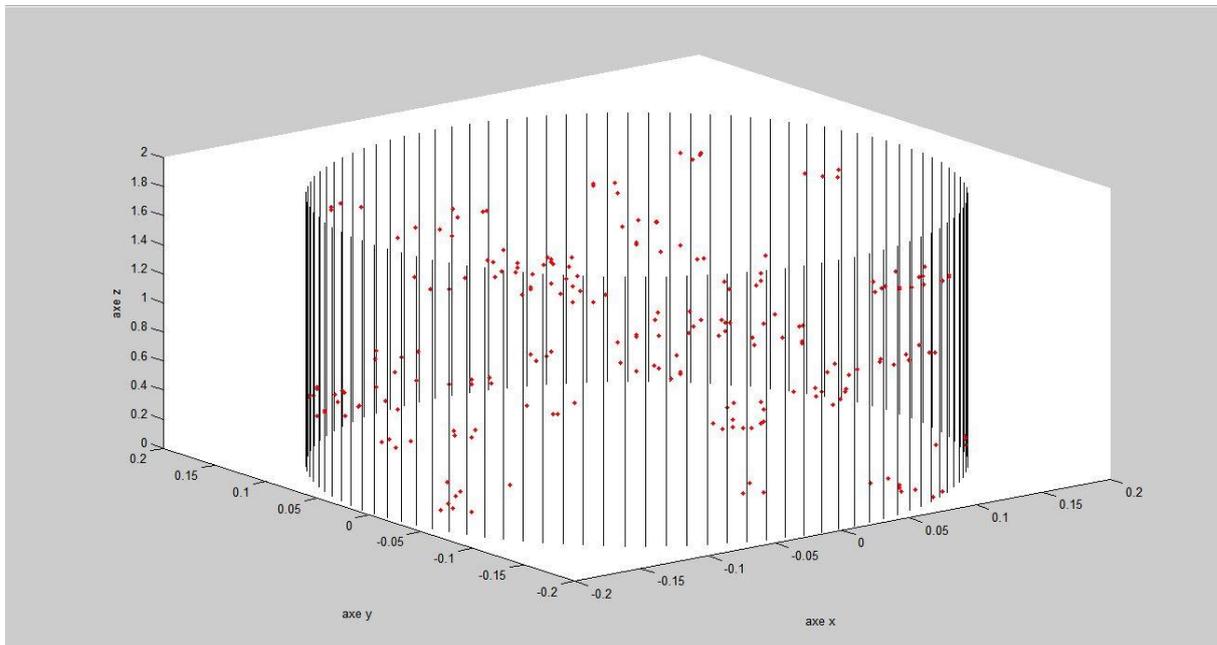


Figure 23: Génération des 218 premiers points qui serviront pour la mise en place du maillage

Comme le montre la Figure 21 la position des 218 premiers points (en rouge) n'a rien de logique.

La création du maillage vient après cette mise en place de points. Chaque point va correspondre à un angle de tétraèdre (élément constitutif du maillage) et le logiciel va créer une ligne passant par tous les points de manière prédéfinis afin de produire le maillage, seul condition ne jamais passer au milieu d'un tétraèdre et respecter la taille maximum de prédéfinis.

# D'un point de vue critique

---

Comme pour tout travail, une réflexion critique est à porter, sur ce qui s'est déroulé, ce qui a été fait, ce qui a été écrit.

D'un point de vue général, rien n'est à mettre en défaut sur le côté technique, cela dis je suis un néophyte du milieu de la recherche ce qui implique un manque de jugement concret. Cependant durant tout le déroulement de mon stage toute l'équipe de recherche était avec moi pour m'expliquer le déroulement et le fonctionnement de la recherche et de mon matériel de travail. Après vient se mettre en relief mon travail, ce que j'ai rendu, ce que j'ai fait au sein de ces 6 mois de stage. La principale critique/réflexion sera donc portée la dessus.

## 1/L'aspect technique

L'étude c'est porté sur la caractérisation de l'effet du complexe lixiviat-biogaz sur les mesures de résistivité électrique dans une colonne de déchet non dangereux. Il s'agit au final de pouvoir utiliser ces résultats et de les appliquer à des centres de stockages de déchet de type bioréacteur.

Le travail a été mené sur une colonne de 1,8m de hauteur, il s'agit à l'origine d'une colonne en 3 tronçons de 0,9m mais dans notre étude seulement deux morceaux ont été utilisés. Deux bout de colonne seulement car il était plus aisé de travailler sur une colonne de 1,8 m que sur une colonne de 2,7 mètres de hauteur. Les sections ont été percées de trou prévu pour l'instrumentalisation en sonde (électrodes pour les mesures, suivi de température, de pression). La position des trous est choisie par nous et suivant ce que l'on définit, ce qui nous offre un degré de liberté dans l'étude.

De mon point de vu, ce choix de support d'expérience convient parfaitement pour suivre un transfert hydrodynamique dans un milieu type déchet. Il permet de ramener un sujet d'étude de la taille d'une décharge à un espace restreint convenable à un laboratoire. De plus un cylindre offre une résistance mécanique très grande par rapport à un support carré ou rectangulaire. A ce paramètre vient ce rajouter la définition des mesures, un cylindre offre une symétrie parfaite et ne contient aucun angle mort.

Outre le support d'étude, dont le choix est régi par le côté pratique, le matériel introduit dans cette colonne est du déchet non dangereux. La sélection de l'objet de recherche a été faite à partir des différents travaux effectués par l'équipe. En effet une partie de l'équipe travail sur le suivi de la réinjection de lixiviat dans un centre de Stockage, à CUVES (50). Le déchet a donc été récupéré directement sur un site, plutôt que d'être fabriqué dans le laboratoire. Ce choix de déchet nous apport une crédibilité plus forte dans l'interprétation de nos résultats car le plus proche de la réalité.

C'est donc sur cette colonne que les mesures de résistivité se sont déroulées. Mais pas seulement, quitte à avoir un matériel frais et disponible, des études sur la production de gaz, l'effet de la température et son évolution et la teneur en eau ont été étudiés.

L'étude de la résistivité est faite par méthode ERT, cette méthode de prospection électrique est celle qui convient le mieux à une analyse tridimensionnel du milieu. La méthode ERT étant utilisée sur les centres de stockages c'est donc elle qui est choisie ici. Les méthodes électriques sont des outils de mesure géophysique non intrusive et facile à mettre en place d'où leurs sélections. Sachant que notre étude ce calque sur ce qui se passe en centre de stockage, le choix d'une autre méthode de mesure ne s'amène pas, il faudrait pour cela revenir à pourquoi elles sont utilisées dans ces centres mais ceci n'est pas le sujet de mon stage.

Le point important pour cette méthode est le nombre et le positionnement des électrodes sur la colonne, ce choix va conditionner la définition de nos résultats. La partie haute de ma colonne à été l'ancien sujet d'étude d'une recherche sur la circulation hydrodynamique en milieu poreux ce qui implique que les électrodes ont déjà été misent en place. Initialement ces colonnes sont perforées par 12 électrodes placées sur 3 lignes séparées de 30 cm avec 4 électrodes par ligne, disposées à 90° chacune. Sur la cellule du haut 42 électrodes ont été introduites, 2 lignes de rajoutées et 4 électrodes en plus par ligne. La colonne du bas quant à elle n'a subis aucune autre perforation et contient son nombre initial d'électrode.

Le choix du nombre et du positionnement m'a été imposé par la durée de mon stage, en effet il était impossible de rajouter des électrodes à la colonne. Cependant ceci n'a pas posé défaut car avec ce jeu d'électrode les mouvements hydriques sont identifiables.

Outre les électrodes des capteurs de pression ont été rajouté dans la colonne, 4 dans le déchet et 1 en haut de la colonne. Ces capteurs sont placés afin de voir la répartition de la présence de gaz dans la colonne, cependant seule le haut de la colonne en est pourvue. Un capteur dans la partie base aurait permis d'augmenter la définition de la pression. Il a été vu durant l'essai que les 5 capteurs étaient parfaitement synchronisés, un autre capteur n'aurait donc été que superflu.

Une autre utilité au capteur a été vue, celui d'indicateur de niveau d'eau. Pour être sûr de l'indication de piézomètre, les capteurs ont été utilisés. Pour cela un autre capteur en bas de colonne aurait pu être le bienvenu.

Autre point au sujet des capteurs, leur conception. Les capteurs sont des sondes avec un tube en PVC avec un bouchon :



Photo 7: sonde de pression

Ce tube empêche le déchet de rentrer en contact direct avec la sonde, et ainsi peut mesurer la pression du milieu. Cependant l'eau peut rentrer dans ce tube en pvc et coincer des bulles de gaz et ainsi modifier les mesures. Si dans l'avenir ces sondes veulent aussi permettre d'indicateur piézométrique, un trou devrait être aménagé juste à l'extrémité de la sonde pour permettre l'évacuation de potentielles bulles de gaz.

La mesure de la température est faite en continu par fibre optique, cette disposition permet de suivre avec une meilleure surface de définition la température dans la colonne. Cinq mètres de

fibres optiques ont été mise en place tous les 30 cm de déchets pour accroître la résolution. Ce dispositif est beaucoup mieux venu qu'une sonde ponctuelle pour la caractérisation de la température dans le déchet.



Photo 8: pose de la fibre optique

La photo 8 montre la mise en place de la fibre optique. La fibre était reliée au DTS relié lui-même à son propre ordinateur. Sur cet outil de mesure aucune remarque ne peut être apportée, car actuellement rien ne nous permet de vraiment caractériser à 100% la distribution de la température dans un milieu. C'était la seule solution la plus optimum.

Le petit point critique serait à porter sur l'injection d'eau. Le fait de l'injecter par le bas est la solution la plus logique pour être sûr d'une saturation intégrale de la colonne. Le souci vient de l'injection ou de celui qui injecte, les temps de mise à niveau et de stabilisation ont été faite de manière arbitraire et sûrement beaucoup trop rapidement. Ce qui implique une saturation pas forcément totale de la colonne.

L'autre point est la méthode d'injection, trop de petite perte d'eau non quantifiable on eut lieu ce qui a apporter au mesure de volume injecté une incertitude. Il n'est de même pour la récupération du lixiviat. Nous avons validé le fait que 1kg=1L d'eau exactement, donc chaque volume d'eau injecté ou récupéré était pesé pour en définir la masse et donc le volume.

Toutes ces petites erreurs ou approximation on générées des incertitudes sur les mesures d'eau et donc les calculs de teneur en eau.

Sur la partie technique il est plus question de problème de méthode et de protocole que de matériel. Et c'est plus moi qui suis à mettre en cause pour les possibles incertitudes. De mon point de vue, le matériel qui m'a été mis à disposition était complètement adapté à l'expérience. De plus je n'ai manqué de rien, que ce soit au niveau matériel (3 ordinateurs m'ont été mis à disposition ainsi que des machines virtuelles pour les calculs d'inversion, ainsi qu'un atelier pour les réparations) ou logistique (le Syscal qui avait grillé par un orage a été directement réparé).

## 2/L'étude des résultats

Dans ce rapport je me suis essentiellement concentré sur l'obtention d'une valeur moyenne de résistivité à saturation ainsi que de mettre en évidence l'effet de la pression sur mes valeurs.

Ici je vais présenter tout ce qui est lié à l'analyse mais aussi au traitement des données. Les données brutes récupérées par le Syscal proviennent d'une configuration de l'appareil choisie par

nos soins, il ne s'agit aucunement d'un protocole prédéfini. J'ai sélectionné ces paramètres après plusieurs tests sur la colonne remplis en eau. Et j'ai choisi la configuration qui prenait le moins de temps de mesure (17min par séquence Syscal) mais aussi qui avait le meilleur retour en valeur d'intensité et de  $\Delta V$ .

Ce choix est contestable et modifiable mais pour moi correspond à la meilleure configuration de mesure.

Une fois la colonne remplis avec le déchet, les mesures ont pue démarrer. Sur les valeurs de retour, un tri a dû être fait car certain quadripôle n'était pas dans les normes de traitement, sûrement dû à un mauvais contact des électrodes. Ce traitement a été fait en se basant sur la littérature ainsi que les connaissances des gens du laboratoire. Toutes les valeurs d'intensités inférieures à 10mA ou les  $\Delta V$  compris entre -20 et 20V ont été supprimées car hors des valeurs acceptable pour le traitement de données. Là-dessus je ne peux m'avancer car je n'ai pas l'expérience requise pour dire ou évaluer la pertinence de ce choix.

Un autre traitement a été fait celui de la répétabilité des mesures. A chaque mesures nous avons fait 3 répétitions et de ces répétitions et des écarts types nous avons extrait les quadripôles qui avant une trop grande variabilité.

Tout ce travail sur le bruit est fait pour retirer tous les artefacts qui pourraient être analysés comme résultats alors qu'ils sont générés par la prise de mesure.

L'inversion des valeurs est faite à partir des paramètres trouvés par modélisation et validée par la comparaison des résultats à cellule homogène (remplis d'eau). Cependant les faibles incertitudes dues au position d'électrode impact de manière plus ou moins important sur l'inversion, ce qui signifie qu'une meilleur définition des positions des électrodes aurait permis de mieux contraindre les paramètres. On reste quand même dans une gamme d'erreur plus qu'acceptable.

Une représentation des résistivités apparente aurait pu être faite, le souci est qu'aucun logiciel ne permet de représenté les résistivités apparente d'un cylindre. Donc seulement les inversions sont traitées et analysées. Le retrait du bruit générer par l'inversion est fait par extraction des valeurs d'écart type supérieures à 5%. Comme précédemment cette valeur seuil est choisie suivant la littérature.

Cette valeur aurait pu être diminuée ou augmentée, si on l'avait diminuée beaucoup plus de partie de l'inversion aurait été amputée et donc réduit les zones d'analyses, si on l'avait augmentée des parties que ne devrait pas être identifiable mais juste dues à l'inversion serait analysées et donc fausserais le résultat.

Viennent ensuite les méthodes d'analyses. L'analyse est faite en fonction de ce que l'on recherche. Dans notre cas, nous cherchons mettre en avant l'effet de la teneur en eau et de la pression. Pour cela nous avons choisi d'étudier deux zones caractéristiques pour ces phénomènes, la zone haute et basse. Ce choix vient d'une réflexion avec l'équipe pour essayer de mettre en avant les deux effets recherchés.

Ces cubes ont la particularité de s'affranchir des effets de bord mais on le défaut de ciblé une seul zone qui n'est pas forcément caractéristique du milieu, car comme on l'a vu précédemment le milieu n'est pas complètement homogène, la répartition du gaz ou de l'eau non plus.

De ce point de vue la une autre approche en tranche c'est vu testée. Cette analyse en tranche apporte un confort quant à la spatialisation de l'étude mais aussi de pouvoir comparer les milieux. Le

choix de 30cm est arbitraire, des tranches de 20 voir 10cm auraient pu être faites. Mais nous recherchons un phénomène et non un objet précis donc la précision de 20 ou 10 cm est de la sur-donnée.

Nous avons réussi entre autre à montrer que la pression n'impactait pas sur les valeurs de résistivité alors que la teneur en eau oui. Bien que l'effet de la teneur en eau soit connu, le phénomène mis en avant lors des saturations et désaturations montre que l'on peut définir les zones à capacité au champ des zones à saturations ou à l'état sec.

Dans l'absolu, mon travail a répondu au sujet de recherche. Il a permis de mettre en avant par étude de résistivité électrique la circulation du complexe lixiviat-biogaz. Certain choix ou paramètres peuvent être contestable mais ce ne sont pas eux qui ont joué sur le résultat. L'étude étant faite de manière qualitative (comparaison de deux courbes) sur des objets ayant les mêmes paramètres, les résultats ne sont pas contestables. Cependant le problème sur la valeur exacte de teneur en eau dans le milieu nous met une épine dans le pied. Elle nous empêche de vraiment traduire ces effets.

MERCI POUR VOTRE ATTENTION.