

# Méthodologie d'optimisation d'un mélange complexe de substrats pour la digestion anaérobie dans différentes conditions d'exploitations

NAJI Amar<sup>1,3,4\*</sup>, DUJANY Arnaud<sup>2</sup>, GUERIN Sabrina<sup>1</sup>, ROCHER Vincent<sup>1</sup>, PAUSS André<sup>4</sup>, RIBEIRO Thierry<sup>3</sup>

<sup>1</sup>SIAAP - Service public pour l'assainissement francilien, Direction Innovation, 82 avenue Kléber, 92700 Colombes

<sup>2</sup>Institut Polytechnique UniLaSalle, URR 7511 B2R. 19 rue Pierre Waguet, 60000 Beauvais, France

<sup>3</sup>Institut Polytechnique UniLaSalle, Université Artois, ULR 7519, 19 rue Pierre Waguet, BP 30313, 60000 Beauvais

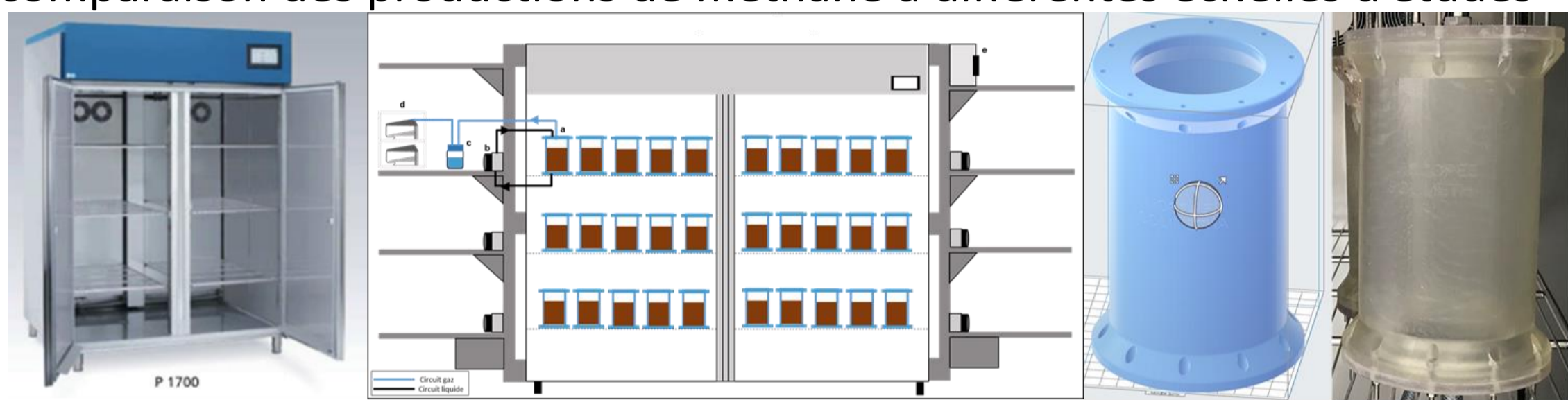
<sup>4</sup>Alliance Sorbonne Université, Université de Compiègne, Transformations Intégrées de la Matière Renouvelable (TIMR), Rue Roger Couttolenc, CS 60319, 60203 Compiègne

## CONTEXTE ET OBJECTIFS

La loi de la transition énergétique pour la croissance verte 2015 vise à la préservation des ressources et à la valorisation des matières existantes pour produire de l'énergie. La production de déchets en France en 2020 représente 315 millions de tonnes dont 20,1 millions sont des ordures ménagères et 46,4 millions sont des déchets organiques comprenant les boues issues de l'assainissement des eaux usées (ADEME 2023). Afin de valoriser ces déchets, un partenariat a été établi entre le SIAAP, l'UTC et UniLaSalle dans le cadre du projet Méthacopée inscrit au programme de recherche MOCOPEE (Modélisation Contrôle et Modélisation des Procédés d'Épuration des Eaux)

Ce projet a comme objectifs :

- La conception du matériel permettant de réaliser les expériences tout en minimisant le prix, le temps d'expérience ainsi que la place allouée.
- Le développement des méthodes opératoires d'optimisation et de prédiction de la co-digestion anaérobie de mix d'intrants (boues urbaines (BRG), fraction organique des ordures ménagères (FOR) et le fumier équin).
- La comparaison des productions de méthane à différentes échelles d'études



Pilote conçu pour étudier le plan de mélange de substrats en voie solide

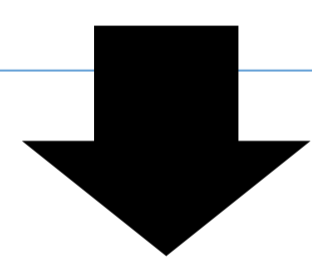
## DEMARCHE

### Voie liquide (MS < 15%)

#### Plan de mélange

**Substrats:** boues urbaines, fumier équin, FOR  
**Appareil:** AMPTS  
**Nombre d'expériences :** 9 points expérimentaux + 3 répétitions au centre

**Objectif:** Définir la meilleure composition en substrats (en utilisant le plan de mélange) + créer modèle de prédiction.



#### Évaluation échelle petit pilote

**Substrats:** boues urbaines, fumier équin, FOR  
**Appareil:** Pilotes 10 L

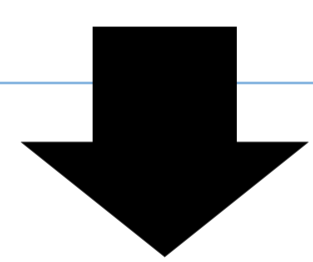
**Objectif:** évaluation de la meilleure composition à l'échelle de 10 L

### Voie solide (MS > 15-20%)

#### Plan de mélange

**Substrats:** boues urbaines, fumier équin, FOR  
**Appareil:** Pilote Méthacopée  
**Nombre d'expériences :** 10 points expérimentaux + 4 répétitions au centre

**Objectif:** Définir la meilleure composition en substrats (en utilisant le plan de mélange). + créer modèle de prédiction.



#### Évaluation échelle petit pilote

**Substrats:** boues urbaines, fumier équin, FOR  
**Appareil:** Pilotes 60 L

**Objectif:** évaluation de la meilleure composition en substrats et meilleures conditions à l'échelle de 60 L

Les résultats présentés dans ce poster sont les résultats de la digestion anaérobie en voie liquide

## RETOMBÉES OPERATIONNELLES

Utiliser des gisements existants et abondants dans la région de l'île de France pour produire de l'énergie et spécifiquement du biométhane

Définir la meilleure composition de 3 substrats ayant des caractéristiques physicochimiques très différentes: fumier, fraction organique des ordures ménagères et boues.

Prédire la production de méthane pour une composition précise de 3 substrats par l'intermédiaire du modèle polynomiale cubique défini

Créer une méthode d'optimisation de la composition en co-substrats applicable à la fois au mode de fonctionnement en voie liquide et solide.

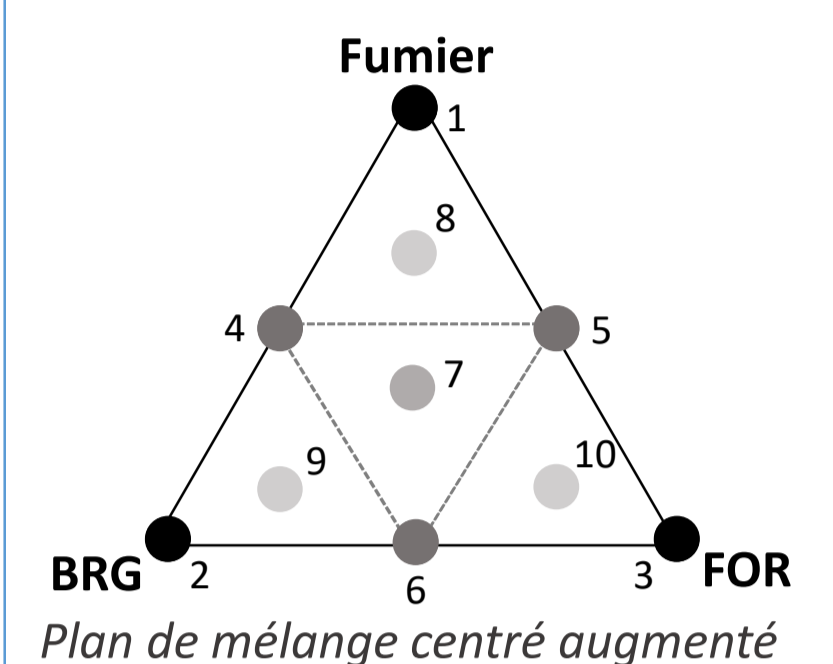
## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail vise l'optimisation de la composition en co-substrats complexes et hétérogènes. En perspective, il sera possible d'étudier divers facteurs opératoires d'optimisation de la digestion anaérobie tels que la température, la recirculation de la phase liquide, etc. en combinaison avec la composition en co-substrats.

## RÉSULTATS

### Étape 1 Expériences avec l'AMPTS (BPC, Lund, Sweden)

Les expériences avec l'AMPTS ont permis d'évaluer la production de méthane à partir de différentes compositions en substrats en se basant sur la méthode de plan de mélange (permet d'étudier un maximum de combinaisons avec minimum d'expériences). Les résultats ont montrés que la meilleure composition en substrats correspond à deux points 9 et 10 avec des composition respective de 16,5% fumier, 67% BRG, 16,5% FOR et 16,5% fumier, 16,5% BRG, 67% FOR.



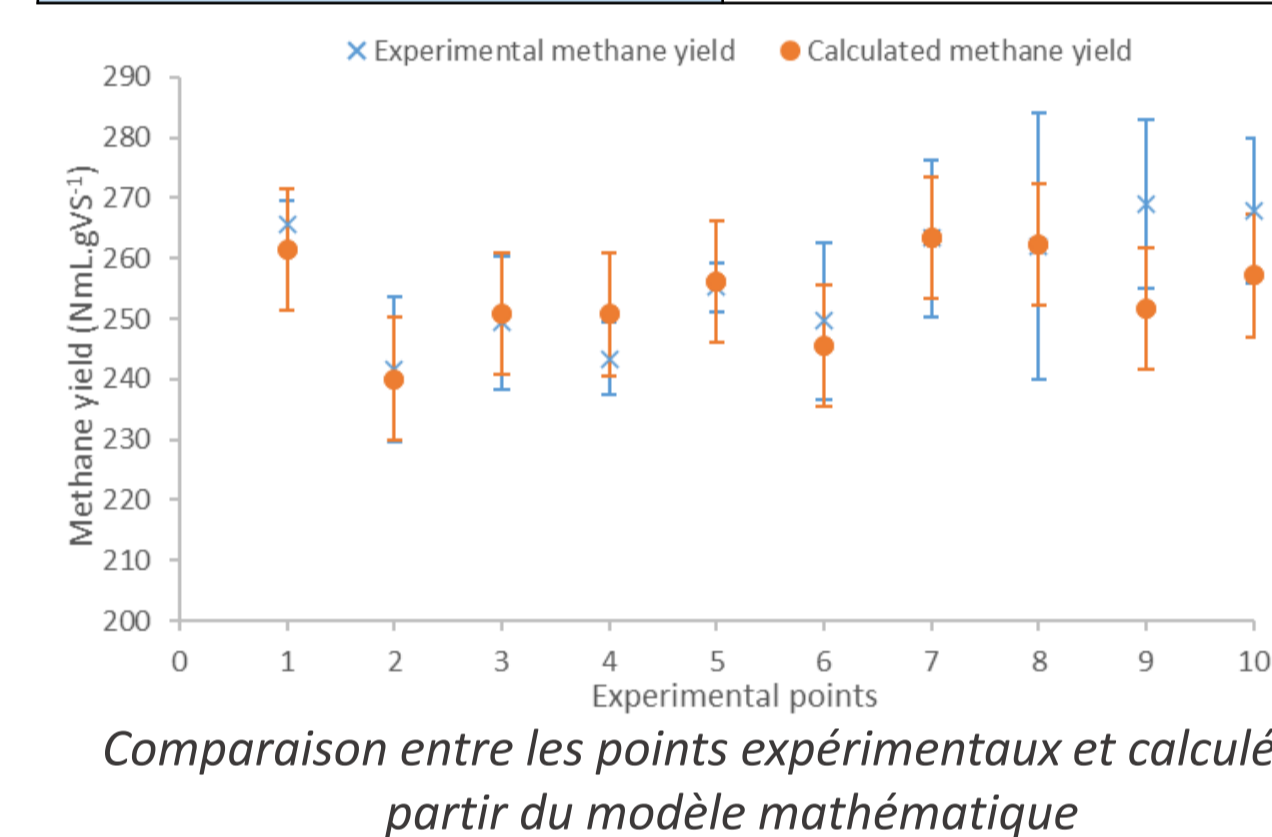
### Étape 2 Analyse de régression sur Excel

#### Modèle mathématique du plan de mélange de 3 substrats du modèle cubique restreint :

$$y = 261x_1 + 240x_2 + 251x_3 + 341x_1x_2x_3$$

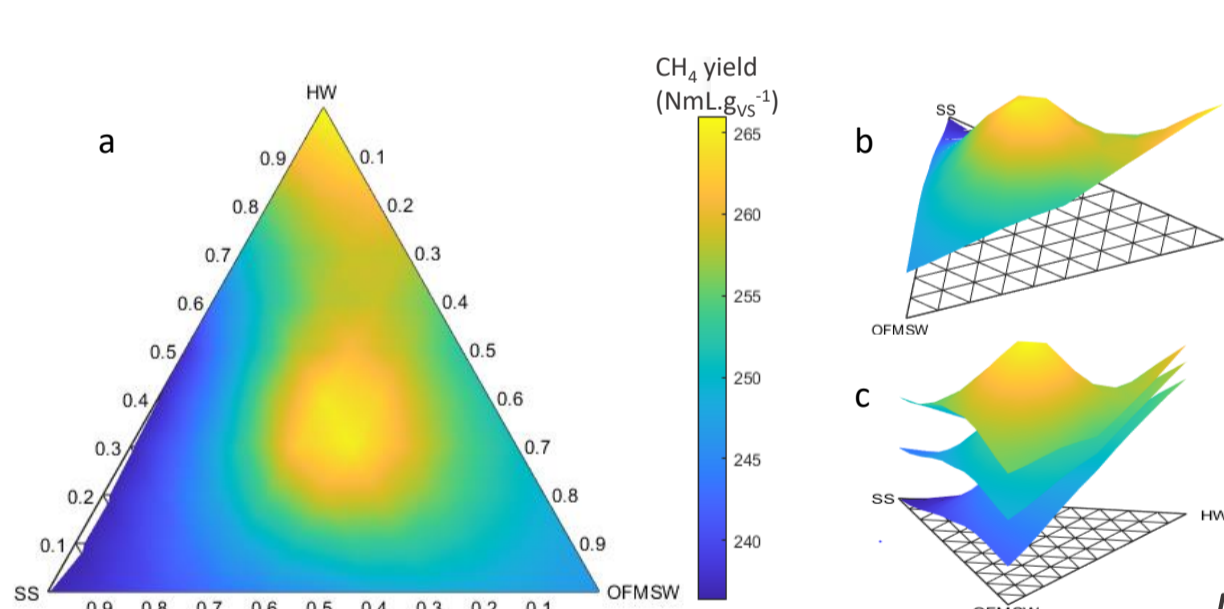
Avec  $x_1, x_2, x_3$  les compositions respectives du fumier, BRG et FOR et les coefficients correspondant à l'impact de chacun seul ou des interactions entre les 3 ( $x_1x_2x_3$ ) sur la production de  $CH_4$ . Les coefficients montrent que le fumier a l'impact le plus important sur le BMP et que la présence simultanée des 3 substrats est avantageuse.

### Étape 3 Validation du modèle en comparant les valeurs expérimentales et calculées du modèle



En comparant les valeurs expérimentales et calculées du modèle, on constate que le modèle est valide et robuste pour être utilisé pour prédire la production de biogaz d'une composition précise de ces 3 substrats.

### Étape 4 Présentation graphique des résultats en 2D et 3D



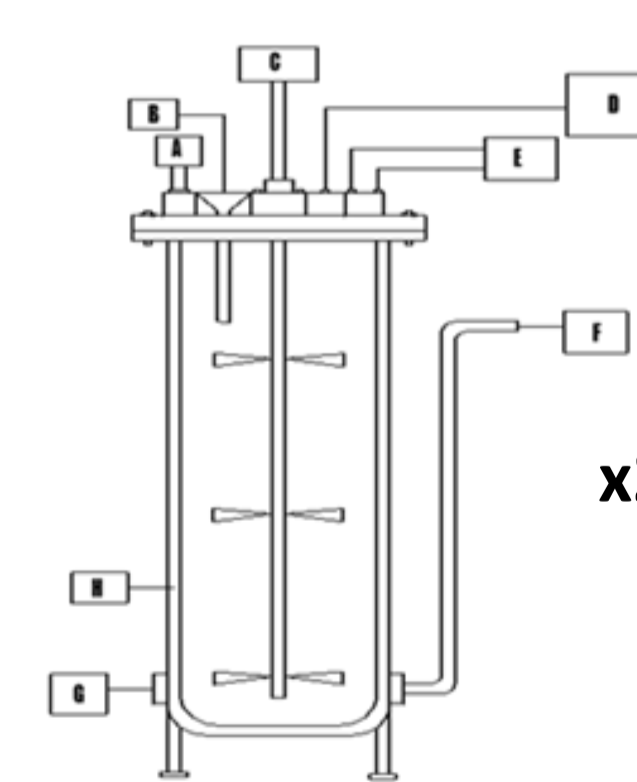
La présentation graphique du modèle mathématique est compatible avec les résultats expérimentaux et donc les régresseurs du modèle sont représentatifs des impacts de chaque substrat seul et de leurs combinaisons.

Mixture surface plots in 2D (a), 3D without considering standard deviation (b), 3D with considering standard deviation (c)

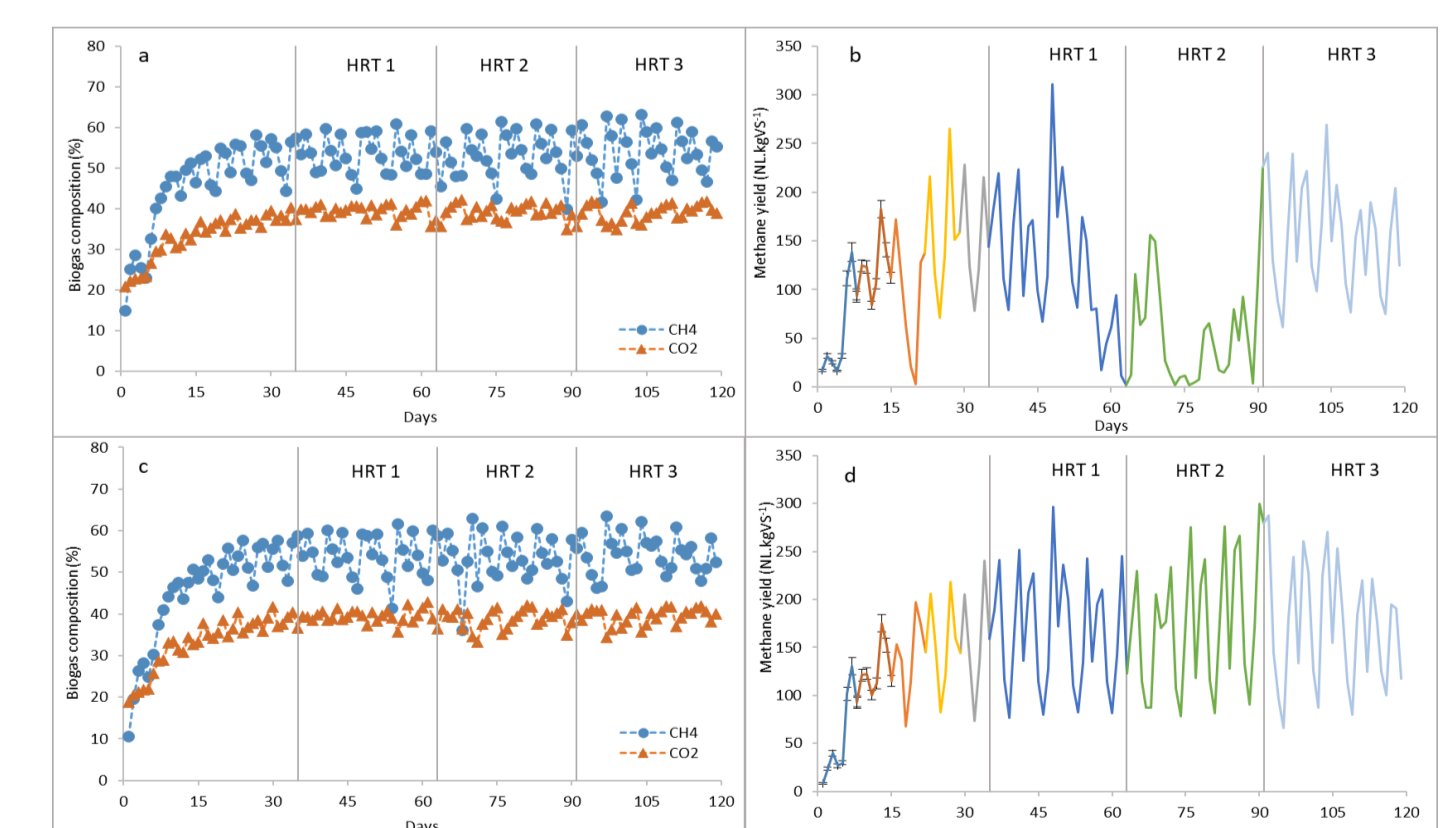
### Étape 5 Validation des résultats à l'échelle de 10 litres

Deux digesteurs en voie liquide, de 10 L de volume utile, fonctionnant en mode semi-continu, ont été lancés en parallèle pour étudier les conditions réelles.

La composition étudiée dans les deux digesteurs est la même de 25% fumier, 50% BRG, 25% FOR (présente dans la zone optimale trouvée). La charge appliquée est de 2,5 kgMV.m<sup>-3</sup>.j<sup>-1</sup> et le TSH est de 20 jours.



Pilote VL 10L semi-continu



Composition of biogas for digester 1 (a) and digester 2 (c), Methane yield for digester 1 (b) and digester 2 (d)

- La composition du biogaz dans les 2 digesteurs est de 60%  $CH_4$  et 40% de  $CO_2$ .
- Les rendements de production de méthane dans les digesteurs de 10 L sont de 59 % et 66 % du BMP déterminé à l'échelle laboratoire.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le programme de recherche Modélisation, contrôle et optimisation des procédés d'épuration des eaux (MOCOPEE) pour le financement accordé à ce travail de thèse. Ils souhaitent également remercier Stéphane Mottelet et Éloïse De Treden pour le support dans la partie modélisation, et Carlyne Lacroix pour le support technique.

Références: ADEME. (2023). Déchets chiffres-clés, Edition 2023, 84 pages. Edition 2023.

Contactez-moi:



Amar.naji@utc.fr; amar.naji@siaap.fr;  
 LinkedIn: Amar Naji