

JRI
2024

26 – 28 mars 2024 PAU

JOURNÉES RECHERCHE INNOVATION

Biogaz Méthanisation



ARVALiS



Impact des conditions opératoires sur la stabilité des digestats et leur devenir dans les sols

David Fernández-Domínguez¹, Logan Sourdon¹, Margaud Pérémé¹, Felipe Guilayn², Jean-Phillipe Steyer¹, Dominique Patureau¹, Julie Jimenez¹

¹INRAE, LBE, ² CIRSEE SUEZ

Introduction: Contexte et Objectifs

Contexte :

- 131 kg déchets alimentaires/an/habitant en Union Européenne; contenant une grande partie de **matière organique (MO) labile** [1]
 - Nécessité de **contrôler les propriétés des digestats** pour maximiser leur **valeur agronomique** [2]
 - **Différents paramètres (typologie substrat, conditions opératoires)** pouvant **impacter ces propriétés** lors de la **digestion anaérobie (DA)**
- Besoin d'**isoler l'impact des conditions opératoires** sur la **qualité** des digestats [3]
- Pratique répandue en méthanisation : **augmentation du taux de charge organique (TCO)** avec **diminution du temps de rétention hydraulique (TRH)** afin d'augmenter la production en biogaz
 - Potentiel **impact** sur les digestats : i) **stabilité** ii) **émissions de GES** durant épandage et stockage iii) **lixiviation de nutriments** [4][5]

Objectifs de l'étude :

- Etudier l'**impact** du **TRH** et du **TCO** sur la **stabilité** et la valeur **fertilisante** des **digestats**
- **Fixer le type de substrat** et sa **concentration** pour **isoler l'impact des conditions opératoires**
 - Caractériser la MO pour **expliquer les mécanismes mis en jeu** au cours de la **digestion anaérobie (DA)**

Matériel et méthodes

3 Réacteurs continus de volume =5L :
TRH et TCO différents

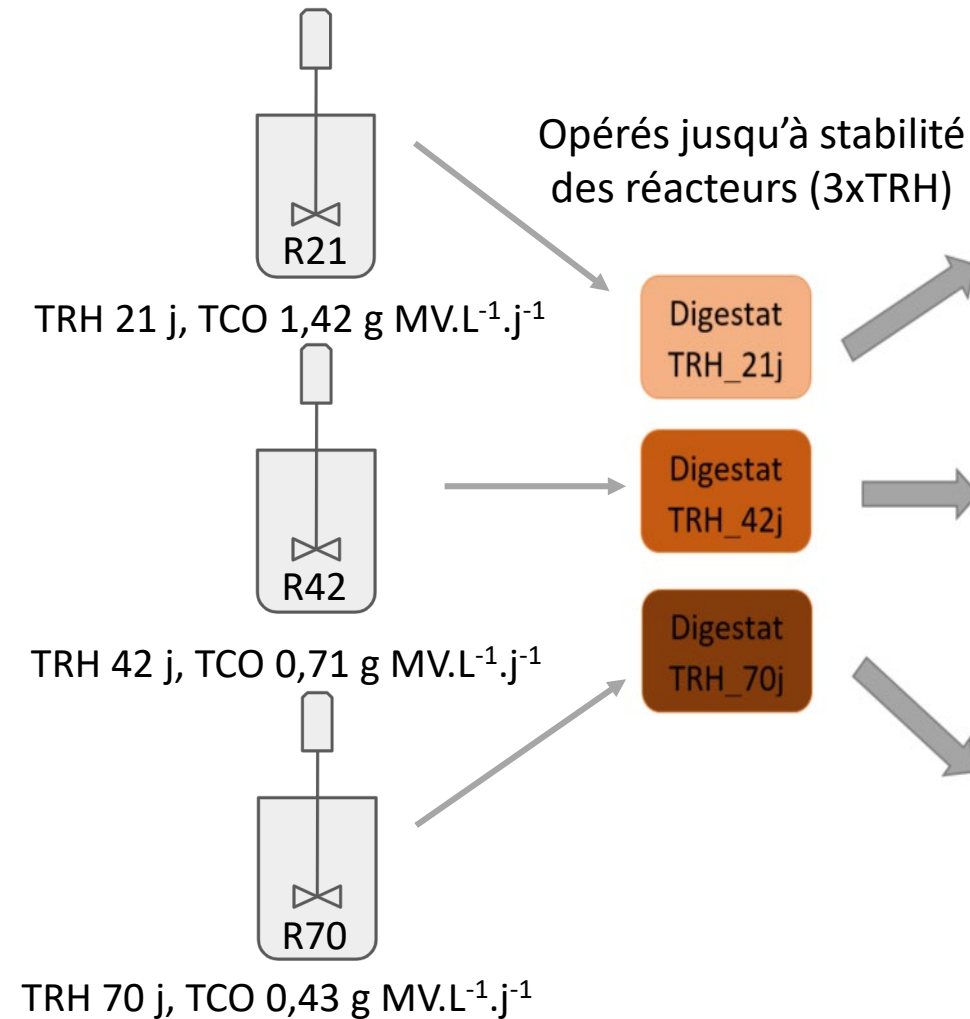
Co-digestion



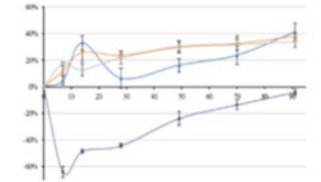
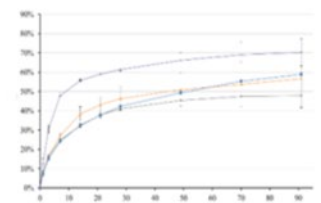
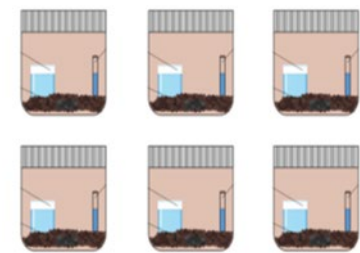
Typologie du substrat fixe:
→ Déchets alimentaires + Foin

Concentration du substrat fixe :
→ 30 g MV.L⁻¹

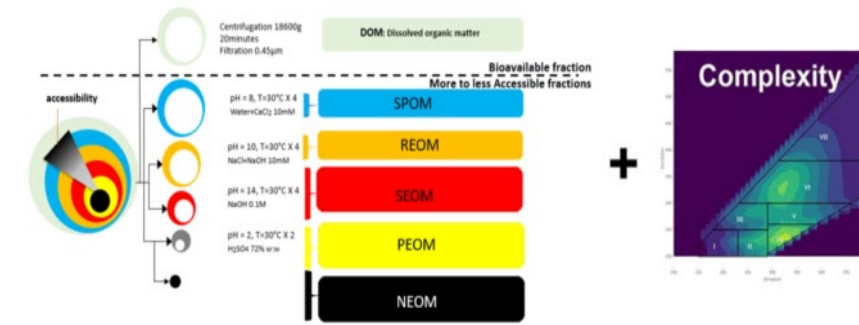
Proportion de co-digestion
→ Déchets alimentaires : Foin
70 : 30 en %MS



1. Incubations sur sol
Minéralisation C et N



2. Fractionnement ISBAMO® et fluorescence 3D



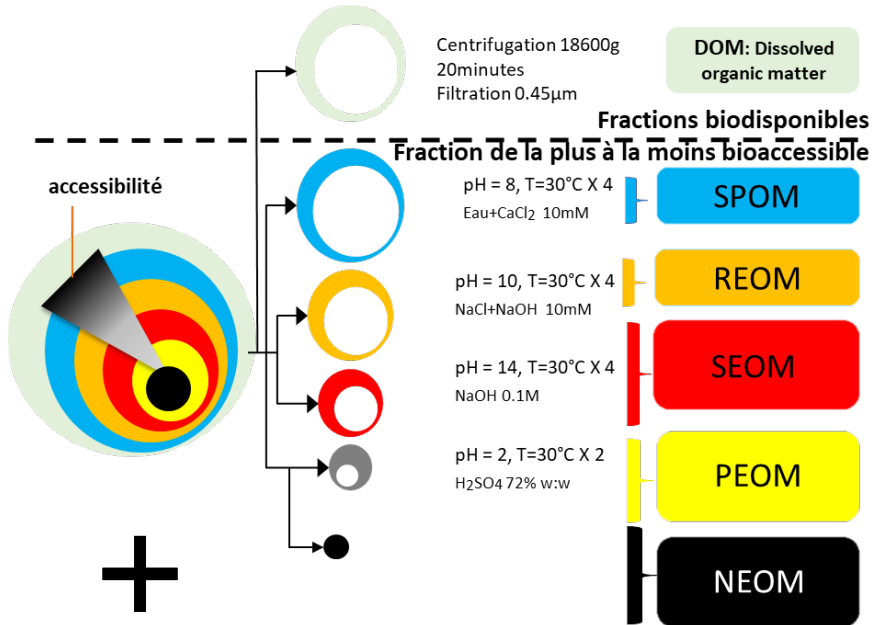
3. Analyses globales : MS/MV ; sDCO ; tDCO ; N

Matériel et méthodes

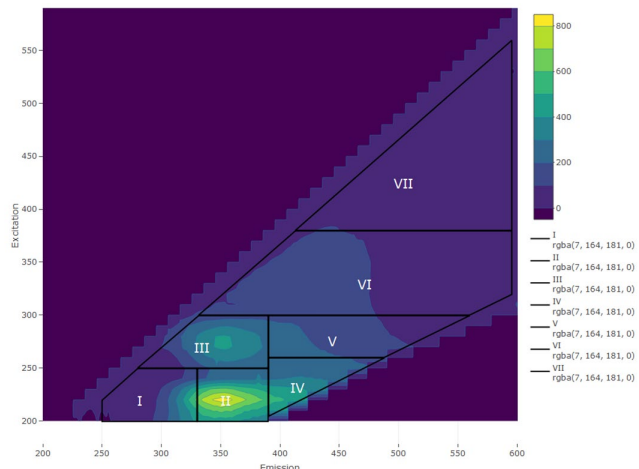
Méthode ISBAMO [6] :

Incubations sur sols [7] :

1. Fractionnement ISBAMO® → Bioaccessibilité



2. Fluorescence 3D → Complexité



Enceinte thermostatée à 28°C

Protocole issu de la norme AFNOR 2009 XPJ 44-163 [7] :

- Digestats et substrat lyophilisés-broyés à 1mm
- 2 g C/kg de sol sec
- Conditions contrôlées T°C et humidité

Minéralisation du C :

- Solution de soude 0,5M, piège à CO₂
- Mesure C inorganique par conductivité

Minéralisation du Norg :

- Extraction au KCl puis analyses colorimétriques (NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻)

Résultats et discussion: Production des digestats

Tableau 1: Performances des réacteurs lors des 6 dernières semaines d'opération

Réacteurs	CH ₄ (%)*	Prod. de biogaz (NmL biogaz.g MV ⁻¹)	Prod. de méthane (NmL CH ₄ .g MV ⁻¹)	Abattement des MV (%)
R21	61,54 ±0,02 ^a	495,50 ±14,19 ^a	346,24 ±10,00 ^a	70,35 ±1,35 ^a
R42	61,66 ±0,01 ^a	515,70 ±17,20 ^b	361,06 ±12,04 ^b	75,83 ±1,35 ^b
R70	61,47 ±0,01 ^a	556,28 ±21,80 ^c	388,28 ±15,21 ^c	76,07 ±1,87 ^b

Meilleures performances avec des TRHs plus élevés / TCO plus faibles :

- i) Abattement des MV
- ii) Productions spécifiques de biogaz et de méthane

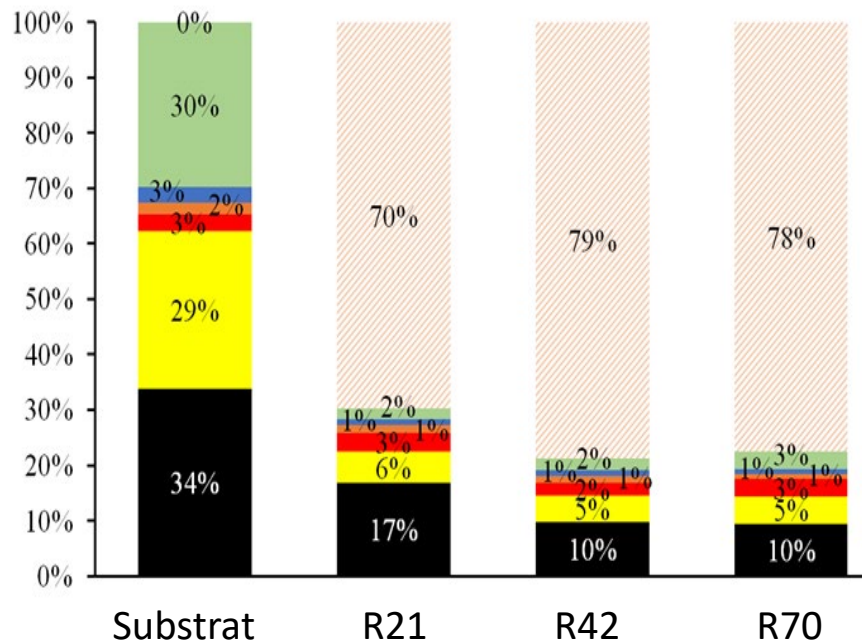
Tableau 2: Principales caractéristiques des digestats stables produits

Paramètres	R21	R42	R70	Substrat
MS (% w/w)	1,32 ±0,03	1,14 ±0,04	1,25 ±0,06	3,56 ±0,30
MV (% w/w)	0,89 ±0,04	0,73 ±0,08	0,77 ±0,06	3,30 ±0,42
DCOt (g.L ⁻¹)	11,21 ±0,87	8,83 ±0,75	9,31 ±0,86	42,90 ±6,10
TAN (g.L ⁻¹)	0,16 ±0,02	0,28 ±0,03	0,58 ±0,04	0,14
TKN (g.L ⁻¹)	0,85 ±0,08	0,83 ±0,14	0,97 ±0,06	0,82
C/N	9,1	10,3	8,3	19,4

- Digestats relativement **similaires** (R21 vs R42 & R70)
- **Diminution** importante des **rapports C/N**

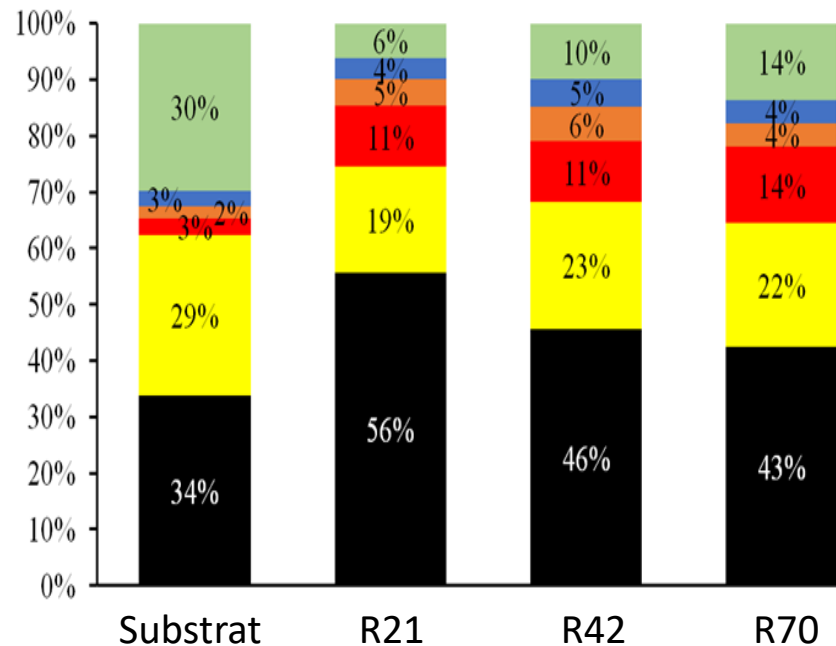
Fractionnement ISBAMO® : bilans en DCO

Fig. 1 : Bilan en DCO des digestats par rapport au substrat



- Abattement de la **MO + important** pour les digestats R42 et R70 → matière + labile
- **Diminution** significative en DCO dans les fractions **DOM, PEOM** et **NEOM**

Fig. 2 : Comparaison des profils ISBAMO® des digestats et du substrat



- **TRHs + grands** augmente l'accessibilité de la MO
- **Augmentation en DCO** de la fraction **DOM** pour les digestats **R42** et **R70**
- Profils ISBAMO relativement similaires (R42 et R70)

▨ Biodégradabilité

■ **DOM :**

Dissolved Organic Matter

■ **SPOM :**

Soluble from Particulate Organic Matter

■ **REOM :**

Readily Extractable Organic Matter

■ **SEOM :**

Slowly Extractable Organic Matter

■ **PEOM :**

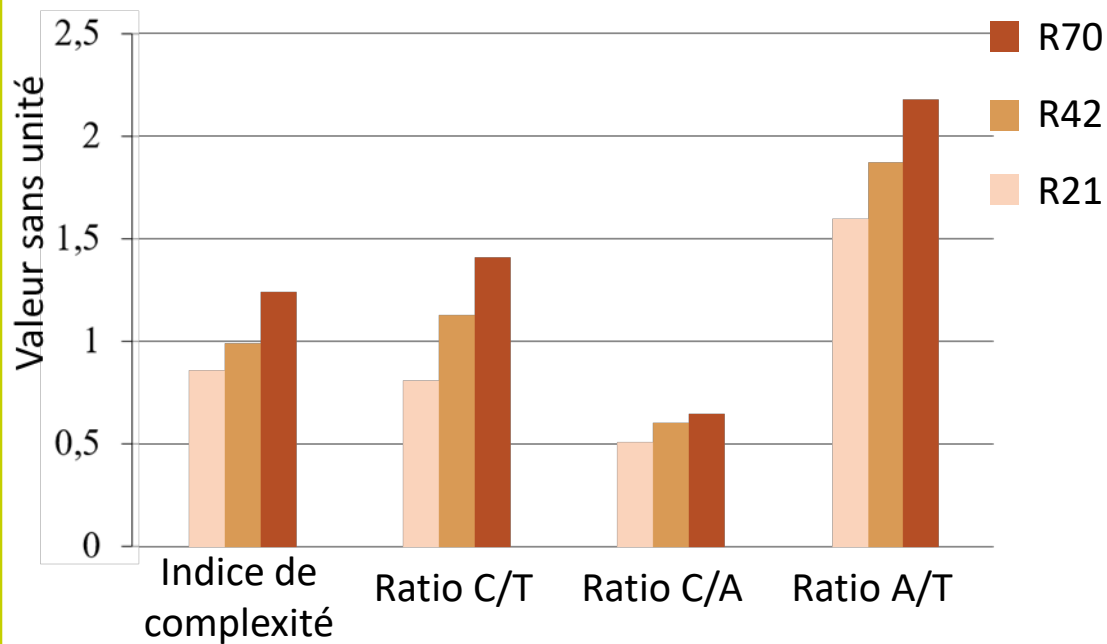
Poorly Extractable Organic Matter

■ **NEOM :**

Non Extractable Organic Matter

Fluorescence 3D sur les fractions ISBAMO® des digestats

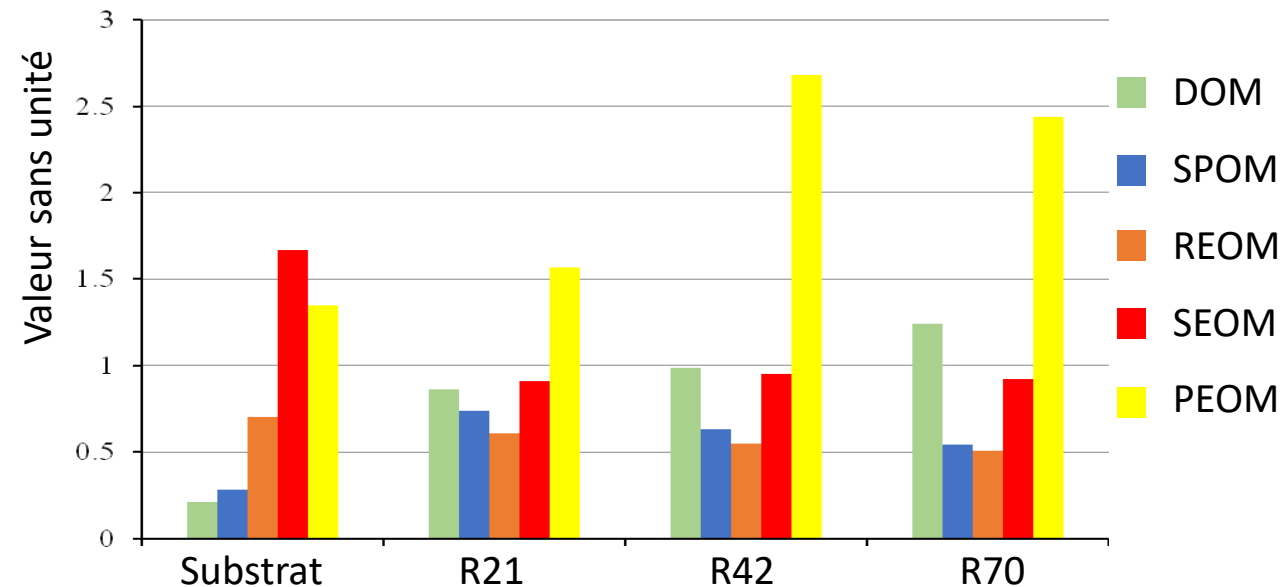
Fig. 3 : Indices et ratios de complexité sur la fraction soluble des digestats, *calculés à partir des résultats en fluorescence 3D*



Ratios = substances de type humiques/substances de type labiles

→ TRH + élevés → degrés de complexité + grands

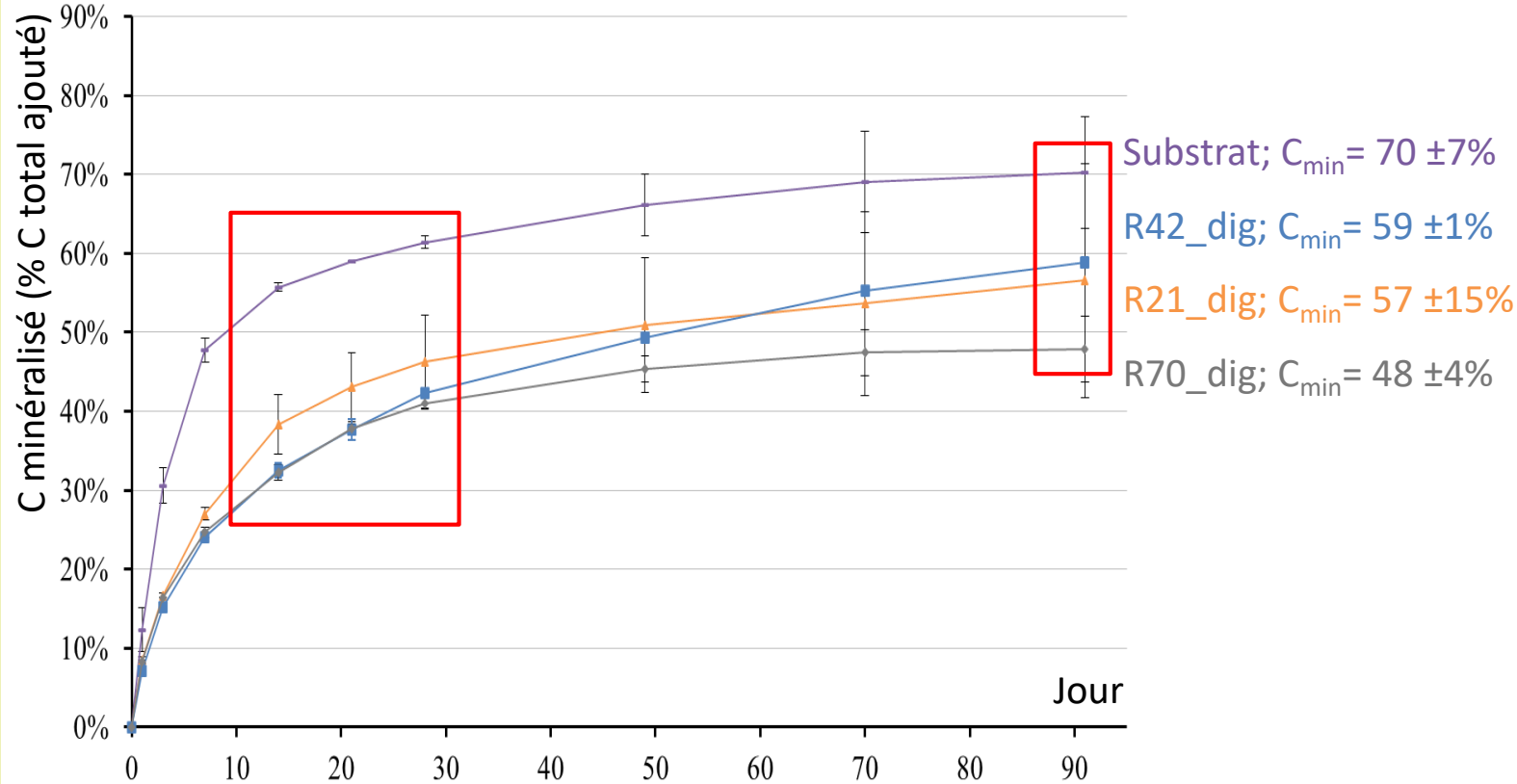
Fig. 4 : Indices de complexité de fluorescence des fractions ISBAMO® sur les digestats et le substrat



- **TRH + élevés** → fraction **PEOM + complexe** : R42/R70 vs R21 (hypothèse hydrolyse de composés récalcitrants)
- **Digestion anaérobie** augmente la complexité des fractions les + accessibles (DOM)

Incubations sur sol : Minéralisation du carbone (C)

Fig. 5 : Minéralisation nette du C des digestats produits à différents TRH/TCO au cours des incubations sur sols



30 premiers jours d'incubations :

Digestat **R21** montre une minéralisation du C légèrement + élevée, par rapport aux digestats **R42 et R70**

Dernier jour d'incubation (J90):

1. Digestat avec **TRH + grand** montre une minéralisation + faible (R42 vs R70)
2. R21 et R42 ne sont pas différents

→ **Meilleure stabilité** de la matière organique

→ **Impact** du TRH/TCO sur la **valeur amendante** des digestats

Fractionnement ISBAMO® : Bilan sur l'azote

Fig. 6a : Rapport TAN/TKN des digestats et du substrat (*Total Ammonia Nitrogen/Total Kjeldahl Nitrogen*)

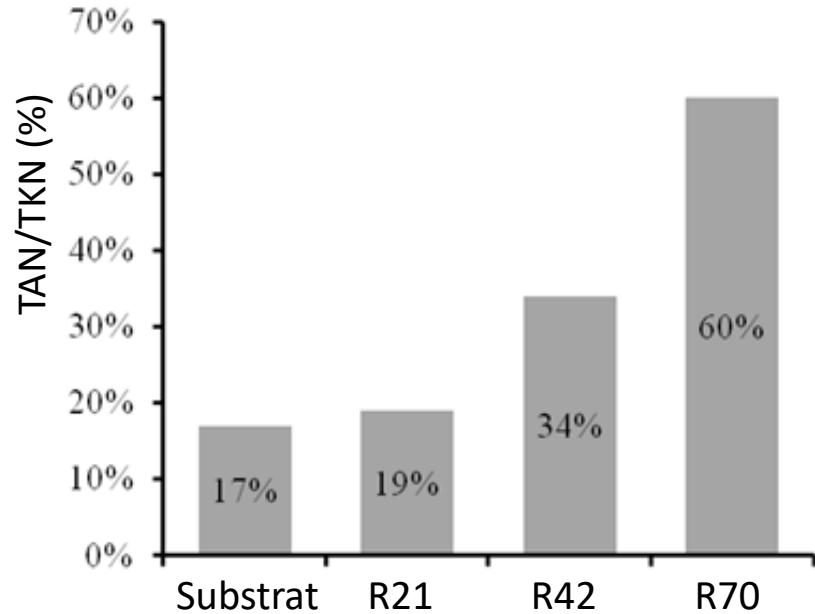
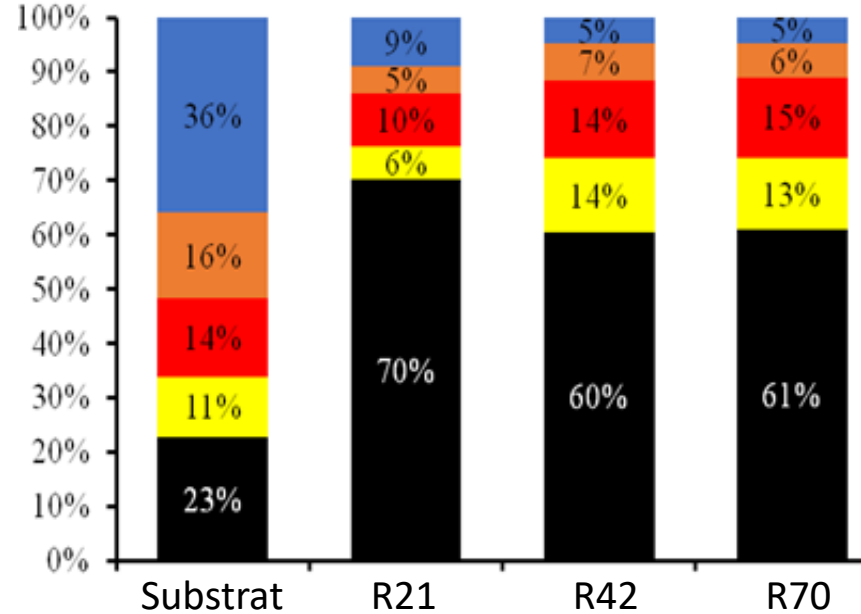


Fig. 6b : Comparaison des profils ISBAMO® des digestats et du substrat, bilan N sur la fraction solide



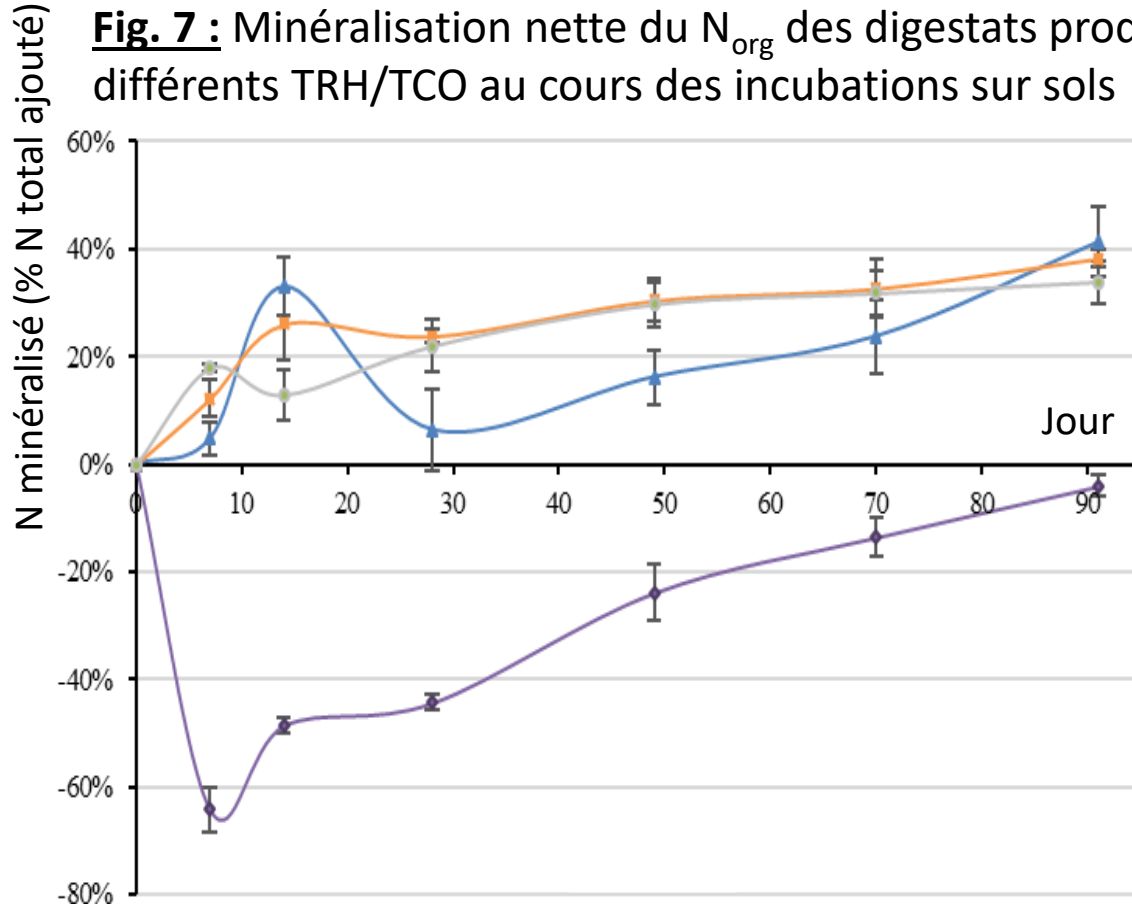
- **SPOM :**
Soluble from Particulate Organic Matter
- **REOM :**
Readily Extractable Organic Matter
- **SEOM :**
Slowly Extractable Organic Matter
- **PEOM :**
Poorly Extractable Organic Matter
- **NEOM :**
Non Extractable Organic Matter

- **Minéralisation du N_{org}** dans les digestats au cours de la DA; hydrolyse de la matière organique
- **Effet + important** pour les TRHs élevés
→ levier pour la valeur fertilisante

- **N_{org} non minéralisé** dans les fractions moins accessibles **PEOM et NEOM**
- Tendances similaires au bilan sur DCO: **impact TRH sur accessibilité et R42 et R70 similaires**

Incubations sur sol : Minéralisation de l'azote (N)

Fig. 7 : Minéralisation nette du N_{org} des digestats produits à différents TRH/TCO au cours des incubations sur sols



	Substrat	R70_dig	R42_dig	R21_dig
N_{min}	-4 ±2%	34 ±4%	41 ±7%	38 ±2%
C/N	19,4	8,3	10,3	9,1

Immobilisation de l'azote pour le substrat :

- Matière organique **labile** et C/N élevé (19,4)

→ Quantité de N **insuffisante** pour dégrader la MO apportée, N minéral provenant du sol extrait et **rendu indisponible** par les **micro-organismes**

Impact de la **digestion anaérobie** sur la valeur **fertilisante** des digestats

Pas d'impact des TRH/TCO sur la valeur de N_{org} **minéralisable** des digestats

Mais **impact** des TRH/TCO sur le N **disponible** ($N_{min} + N_{org_minéralisable}$)

Conclusion et Perspectives

- **Impact des conditions opératoires TRH /TCO:**
 - **TRH + grands** – fractions **solubles + complexes** & **minéralisation de l'azote organique + importante** dans les digestats
 - Effet sur **l'accessibilité** de la **matière organique (ISBAMO®)**
 - Cependant des digestats **relativement similaires** sont obtenus en terme de **C et N minéralisation à long-terme** → **typologie du substrat** et performances
- Résultats potentiellement **non-généralisables** à d'autres **typologies** de substrats
- Etudes pouvant être appliqués pour d'autres **types de substrats** et d'autres **conditions opératoires**
- Mise en avant de l'importance de considérer la **qualité** du digestat attendue pour **optimiser la digestion anaérobie** et **sélectionner les conditions opératoires appliquées**, en plus de la performance du digesteur



MERCI de votre attention



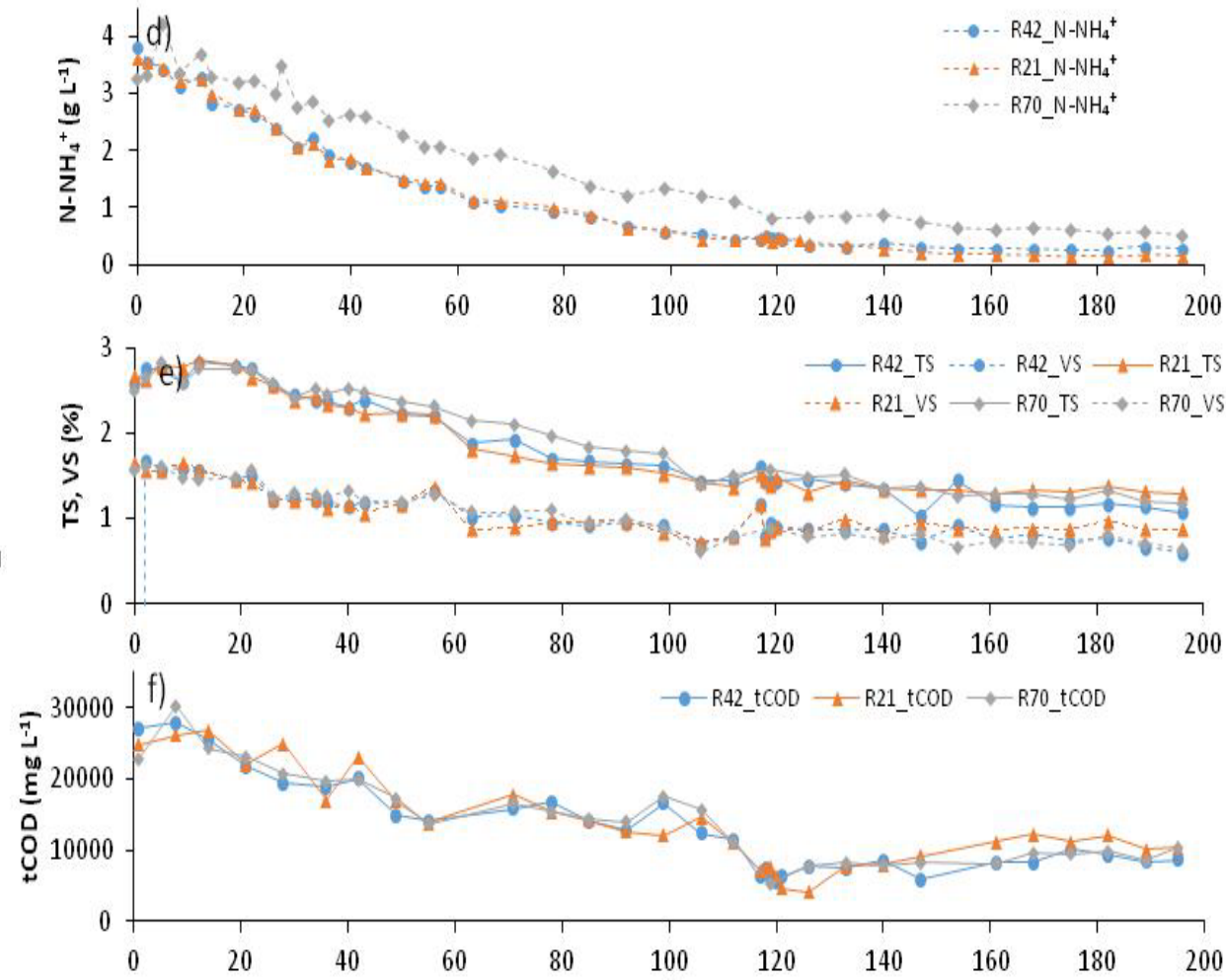
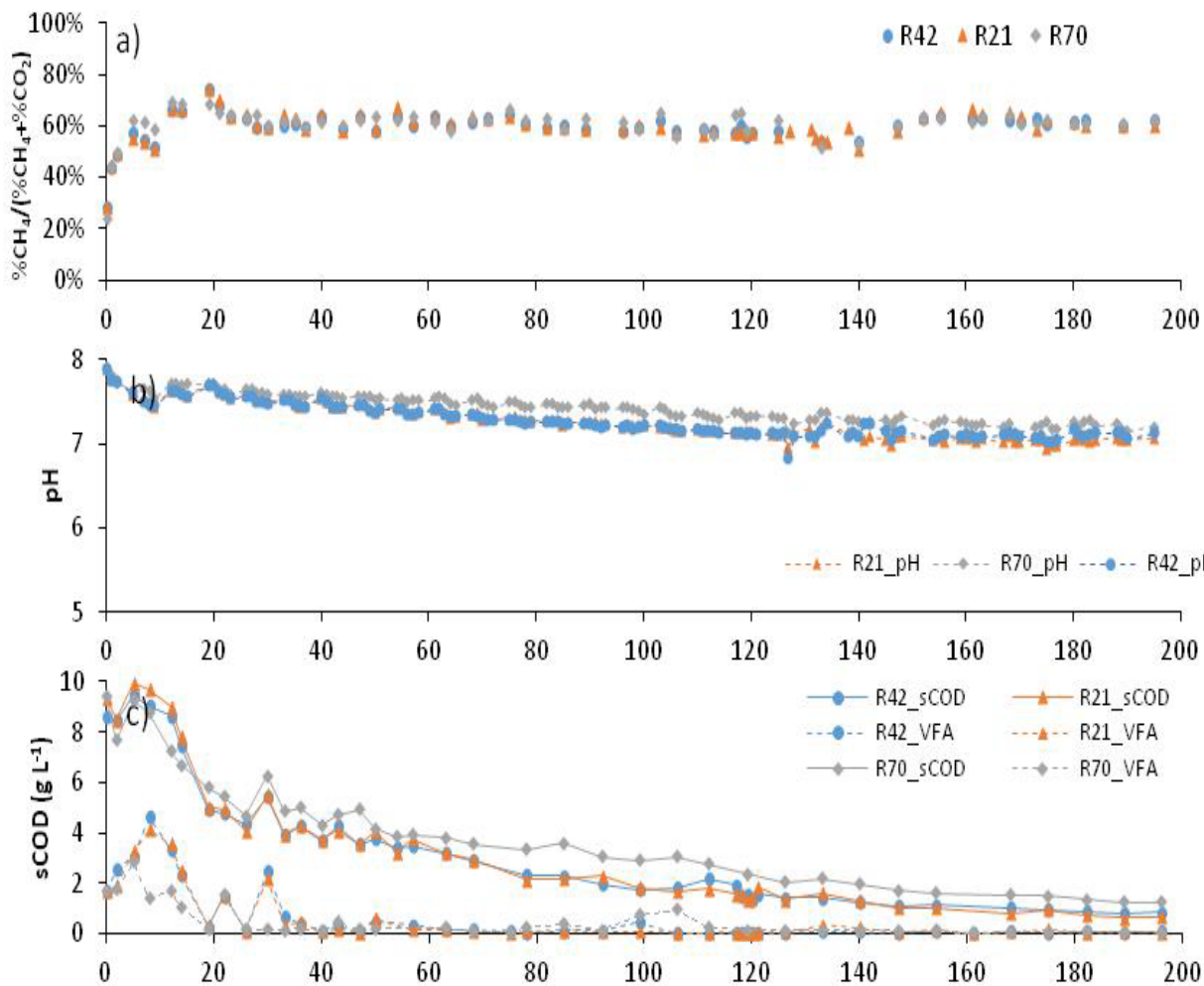
Références

- [1] Ben Tahar I, Fickers P (2021) Metabolic engineering of microorganisms for urban waste valorization. *Case Stud Chem Environ Eng* 4:100148. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100148>
- [2] Guilayn F, Rouez M, Crest M, et al (2020) Valorization of digestates from urban or centralized biogas plants: a critical review. *Rev Environ Sci Biotechnol* 19:419–462. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09531-3>
- [3] Menardo S, Gioelli F, Balsari P (2011) The methane yield of digestate: Effect of organic loading rate, hydraulic retention time, and plant feeding. *Bioresour Technol* 102:2348–2351. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.094>
- [4] Lehtomäki A, Huttunen S, Lehtinen TM, Rintala JA (2008) Anaerobic digestion of grass silage in batch leach bed processes for methane production. *Bioresour Technol* 99:3267–3278.
- [5] Ahlberg-Eliasson K, Westerholm M, Isaksson S, Schnürer A (2021) Anaerobic Digestion of Animal Manure and Influence of Organic Loading Rate and Temperature on Process Performance, Microbiology, and Methane Emission From Digestates. *Front Energy Res* 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.740314>
- [6] Jimenez J, Aemig Q, Doussiet N, et al (2015) A new organic matter fractionation methodology for organic wastes: Bioaccessibility and complexity characterization for treatment optimization. *Bioresour Technol* 194:344–353. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.037>
- [7] AFNOR, 2009. Standard XP U 44-163. Amendements organiques et supports de culture - Caractérisation de la matière organique par la minéralisation potentielle du carbone et de l'azote

Annexes

Performance des réacteurs au cours de l'expérience :

1. composition biogaz 2. pH 3. sDCO 4. N-NH₄⁺ 5. MS, MV 6. tDCO



Annexes

Calculs des indices de complexité de fluorescence 3D

$$V_f(i) (\text{A.U. /mg COD.L}^{-1}) = \frac{V_{f\text{-raw}}(i)}{\text{COD}_{\text{sample}} * \left(\frac{S(i)}{\sum_{i=1}^7 S(i)} \right)}$$

$$P_f(i) (\%) = \frac{100 * V_f(i)}{\sum_{i=1}^7 V_f(i)}$$

$$\text{FCI} = \frac{\sum_{i=4}^7 V_f(i)}{\sum_{j=1}^3 V_f(i)}$$

- V_{f_raw} est la zone de fluorescence brute (A.U./mg O₂ L⁻¹), $\text{COD}_{\text{sample}}$ est la concentration en DCO de l'échantillon (mg O₂.L⁻¹), and $S(i)$ est l'aire (nm²).
- Le volume de fluorescence de chaque zone $V_f(i)$, le % de fluorescence pour chaque zone $P_f(i)$, et le ratio de complexité de fluorescence (FCI), qui représente le ratio entre le % de fluorescence des zones de hautes complexité (IV-VII) par rapport aux zones de faibles complexité (I-III) sont calculés à partir d'un algorithme fait maison sur Scilab 5.5.2