

**OFFRE DE THÈSE 2021**  
**(Pages 2 à 5 de ce document)**

**Valorisation de biomasse lignocellulosique par voie sèche :**  
***Étude de la coulabilité sans contrainte des poudres de biomasse torréfiée***

**PhD Proposal 2021**  
**(Pages 6 to 9 of this document)**

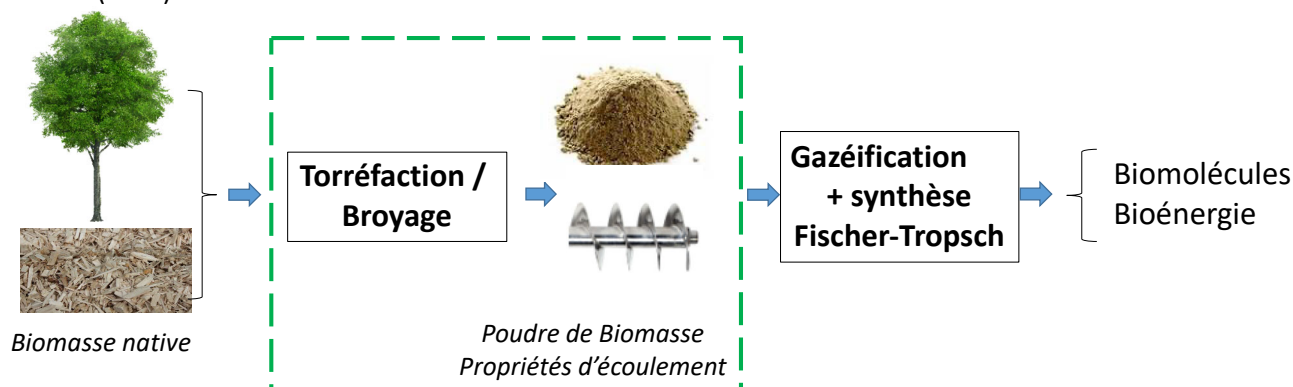
**Valorisation of lignocellulosic biomass by dry process :**  
**Study of the flowability of torrefied biomass powders under unconfined flow conditions**

**Valorisation de biomasse lignocellulosique par voie sèche :**  
***Étude de la coulabilité sans contrainte des poudres de biomasse torréfiée***

**OFFRE DE THÈSE**

**Champs disciplinaires :** Procédés thermochimiques et particulaires, Milieux granulaires, Caractérisation physique, Imagerie, Modélisation & calcul numérique.

**Mots clés :** Biomasse, Torréfaction, Broyage, Granulométrie, Écoulement de poudres, Discrete Element Method (DEM)



**CONTEXTE**

Les biomasses lignocellulosiques sont préférées aux biomasses à potentiel alimentaire car elles offrent l'opportunité de créer de la valeur ajoutée à partir de résidus de cultures ou de nouvelles cultures. L'association de biomasse forestière et agricoles est envisagée pour alimenter de façon sûre et pérenne les unités de transformation industrielle. Enfin il est envisageable de mélanger des biomasses natives et des déchets (Stappf et al. 2019). Ce schéma de production permet de préserver les surfaces nécessaires aux cultures vivrières afin d'assurer l'équilibre impératif entre production alimentaire et production de biens et services. La valorisation industrielle de la biomasse lignocellulosique est donc une alternative crédible au carbone fossile, et ce sans entrer en concurrence directe avec les débouchés alimentaires.

Une des voies de conversion privilégiée consiste en une gazéification (permettant de convertir la biomasse en un gaz de synthèse, CO et H<sub>2</sub>) suivie d'une synthèse Fischer-Tropsch (pour produire des molécules organiques). Cette voie, dite sèche, est complémentaire à la voie humide : hydrolyse et fermentation. Préalablement à la phase de conversion thermochimique, la biomasse lignocellulosique doit être réduite en poudre par broyage pour atteindre des qualités physiques et énergétiques compatibles avec la gazéification. Plus particulièrement, il s'agit de réduire sa granulométrie (à quelques centaines de micromètres) pour augmenter sa réactivité et d'accroître sa coulabilité pour faciliter son stockage, son transport et son injection dans le réacteur. Or, en raison du caractère fibreux de la biomasse lignocellulosique, cette étape de broyage est énergivore et compromet la pertinence économique de cette voie de valorisation. Outre l'amélioration de la qualité énergétique de la biomasse par la diminution du ratio Oxygène/Carbone, il est aujourd'hui admis que la torréfaction (pyrolyse ménagée sous azote) permet de réduire la résilience de la biomasse par l'altération de caractère fibreux et donc d'optimiser le coût énergétique du broyage.

Les propriétés d'écoulement de la poudre obtenue à l'issue du broyage sont donc modifiées par la torréfaction. Ainsi l'application de ce prétraitement est susceptible de favoriser ou d'altérer la coulabilité de la biomasse, et donc de lever des verrous ou, au contraire, de générer des difficultés de stockage, de manutention et d'injection au sein des installations industrielles. À ce jour, l'expertise repose surtout sur l'expérience et l'empirisme. La connaissance des milieux granulaires issus de la biomasse est encore insuffisante pour que puissent être établies des lois de comportement fiables, permettant de dimensionner des équipements industriels. Une



meilleure compréhension et la prédiction des propriétés d'écoulement de ces milieux granulaires est donc indispensable.

Le Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux (CentraleSupélec-Université Paris Saclay, Gif-sur-Yvette) a développé une expertise forte sur le broyage couplé à la torréfaction de la biomasse. Cette expertise se décline selon deux angles :

- d'une part, la maîtrise des procédés par des outils applicables à l'échelle du laboratoire,
- d'autre part, la caractérisation de la biomasse prétraitée (propriétés granulométriques, hygrothermiques, énergétiques, mécaniques, etc.).

Le sujet proposé ici s'inscrit dans ce second axe.

Une première thèse (Pachón-Morales, 2019) a récemment permis :

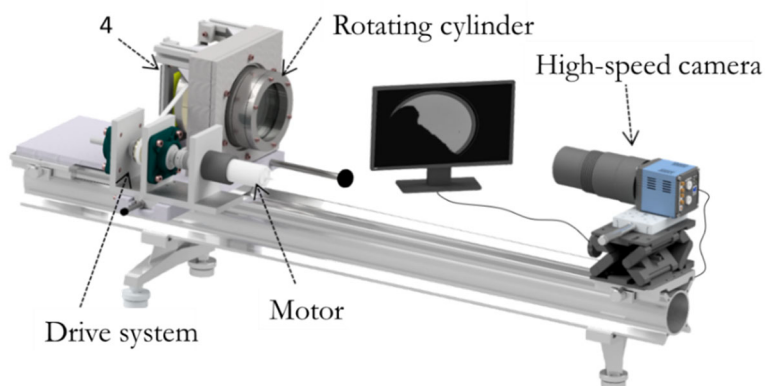
- De démontrer que les faciès de rupture sont d'autant plus réguliers que la torréfaction est intense, ce qui permet d'accroître la coulabilité des poudres malgré la diminution de la taille moyenne des grains et une polydispersité granulométrique plus grande (Pachón-Morales et al. 2019a).
- Que le critère de perte de masse employé en torréfaction pour caractériser l'intensité de traitement peut aussi être employé pour prédire la coulabilité après une étape sous contrainte (Pachon et al. 2017).
- De mettre en place un outil de caractérisation d'écoulements sans contrainte de poudres de biomasses broyées, natives et torréfiées (tambour tournant), ainsi qu'une méthodologie de traitement des données adaptée au caractère cohésif de ces poudres (Pachón-Morales et al. 2020b).
- De mettre en place un outil de modélisation par DEM de ces poudres composées de fibres ou amas de fibres allongées (collaboration avec l'Université TU Delft) (Pachón-Morales et al. 2019b, 2020a)

## OBJECTIFS

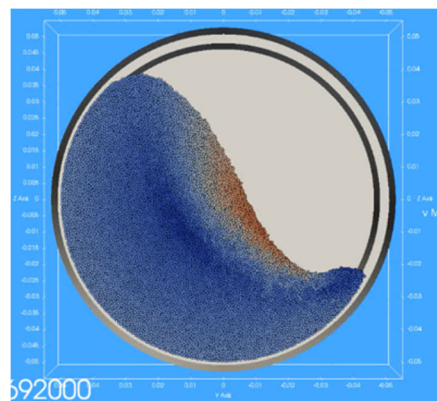
L'objectif général du projet doctoral est d'étudier les propriétés d'écoulement sans contrainte de poudres de biomasse lignocellulosique torréfiée, dont la granulométrie est conforme aux spécifications industrielles et de relier les caractéristiques de coulabilité aux conditions de torréfaction et de broyage.

Plus spécifiquement, le projet doctoral comprend cinq parties :

1. Une étude de broyage de poudre de biomasse native et torréfiée sera menée pour comprendre l'impact des paramètres opératoires (durée, technologie, poudre entière ou fraction) sur les caractéristiques des particules produites et ainsi assurer la maîtrise de ces caractéristiques.
2. La coulabilité de poudre de biomasse sera étudiée dans un tambour tournant (écoulement sans contrainte), en analysant le comportement en avalanche pour des poudres d'origine diverse (essence, intensité de torréfaction, conditions de broyage, tamisage). Ce comportement pourra alors être relié aux caractéristiques des poudres.
3. Les profils d'écoulement observés avec les poudres de biomasse seront comparés à ceux obtenus avec des poudres organiques et/ou minérales de référence. Cette diversité permettra de proposer un facteur de coulabilité en écoulement sans contrainte, comme cela existe pour l'écoulement sous contrainte.
4. La modélisation de l'écoulement des particules de forme allongée sera réalisée au moyen d'une méthode par éléments discrets (DEM), afin de reproduire le comportement mesuré expérimentalement. Une première étape consistera à accroître le caractère prédictif du modèle en prenant en compte des forces électrostatiques interparticulaires, en complément des forces de roulement, de friction et de l'énergie de cohésion déjà considérées. Dans un second temps, le simulateur sera utilisé pour prédire l'impact des paramètres de distribution de taille et de facteur de forme, et d'état de surface des particules de manière séparée.
5. La combinaison des trois premiers points permettra ainsi d'optimiser les conditions de torréfaction et de broyage pour atteindre les propriétés d'écoulement compatibles avec la valorisation industrielle tout en assurant la pertinence technico-économique de la chaîne de procédés.



Tambour tournant : Dispositif expérimental (conception LGPM)



Résultat de simulation DEM

### MISSIONS

Les principales missions de la thèse porteront donc sur :

- la production de poudres à analyser : échantillonnage à partir de biomasse non traitée, torréfaction, broyage, tamisage,
- la caractérisation de poudres de biomasse (granulométrie optique),
- la réalisation de mesures de coulabilité en tambour tournant et l'exploitation des résultats par analyse d'images (Matlab),
- la simulation d'écoulements de poudre de biomasse avec le logiciel LIGGGHTS,
- la valorisation des résultats de recherche sous forme d'articles scientifiques.

Une étude bibliographique sera par ailleurs demandée au doctorant afin qu'il ou elle puisse confronter ses résultats à ceux de la communauté scientifique du domaine.

### MODALITÉS PRATIQUES

D'une durée de 36 mois, le doctorat aura lieu sur le campus de Gif-sur-Yvette (91) au sein du LGPM. Le ou la doctorant(e) sera amené(e) à effectuer une partie de ses expérimentations au sein du Centre Européen de Biotechnologie et de Bioéconomie (Pomacle, 51) où sont hébergés une partie des équipements du LGPM.

Le ou la doctorant(e) disposera de tous les moyens, matériels et humains, nécessaires au bon déroulement de son projet de thèse. Il ou elle pourra s'appuyer sur les compétences du laboratoire, notamment en conception expérimentale et en imagerie. Par ailleurs, il ou elle bénéficiera de moyens matériels et numériques acquis et développés dans le cadre d'un précédent doctorat.

### PROFIL RECHERCHÉ

Ce projet de thèse s'adresse aux diplômé(e)s d'École d'ingénieur et de Master 2 dans l'un des domaines suivants : Génie des Procédés, Sciences des Matériaux, Mécanique ou Formation scientifique généraliste.

La rigueur expérimentale est une qualité nécessaire au bon accomplissement de ces travaux. Il est également attendu que l'étudiant(e) soit dynamique et fasse preuve de curiosité, d'initiative, d'analyse critique et d'autonomie. Le ou la candidat(e) doit démontrer un intérêt pour les sciences numériques (analyse d'images, simulation).

Une maîtrise de la langue anglaise est exigée.

De bonnes capacités relationnelles sont aussi demandées permettant une intégration rapide au laboratoire.

### ENCADRANTS & MODALITÉS DE CANDIDATURE

François PUEL, Professeur (06 65 58 58 64 [francois.puel@centralesupelec.fr](mailto:francois.puel@centralesupelec.fr)) ; Julien COLIN, Maître de conférences (01 75 31 60 04 [julien.colin@centralesupelec.fr](mailto:julien.colin@centralesupelec.fr))

La candidature, comprenant un CV détaillé, une lettre de motivation et les bulletins de notes des deux dernières années, sont à déposer sur

[https://www.adum.fr/as/ed/voirproposition.pl?site=PSaclay&matricule\\_prop=34290](https://www.adum.fr/as/ed/voirproposition.pl?site=PSaclay&matricule_prop=34290) .



## BIBLIOGRAPHIE

Almeida G., Brito J.O., Perré P., 2010 – *Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: the potential of mass loss as a synthetic indicator*, *Bioresource Technology* 101(24): 9778-9784

Almeida G., Santos D.V.B., Perré P., 2014 – *Mild Pyrolysis of fast growing wood species (caribbean pine and rose gum) : dimensional changes predicted by the global mass loss*, *Biomass and Bioenergy* 70: 407-415

Cavagnol S., Sanz E., Nastoll W., Roesler J.F., Zyma V., Perré P., 2013 – *Inverse analysis of wood pyrolysis with long residence times in the temperature range 2010-209°C: selection of multi-step kinetic models based on mass loss residues*, *Thermochemica Acta* 574: 1-9

Dai J., Cui H., Grace J.R., 2012 – *Biomass feeding for thermochemical reactors*, *Progress in Energy and Combustion Science* 38: 716-726

Illic D., Williams K., Farnish R., Webb E., Liu G., 2018 – *On the challenges facing the handling of solid biomass feedstocks*, *Biofuels, Bioproduction Biorefinery* 12(2): 1-16

Pachón-Morales J., Colin J., Pierre F., T. Champavert, Puel F., Perre P., 2017 – *Flowability of lignocellulosic biomass powders: influence of torrefaction intensity*, *EPJ Web of Conferences* 140:4p.

Pachón-Morales J., Colin J., Pierre F., Puel F., Perré P., 2019a – *Effect of torrefaction intensity on the flow properties of lignocellulosic biomass powders*, *Biomass and Bioenergy* 120: 301-312

Pachón-Morales J., Do H., Colin J., Puel F., Perré P., Schott D., 2019b – *DEM modelling for flow of cohesive lignocellulosic biomass powders: Model calibration using bulk tests*, *Advanced Powder Technology* 30(4): 732-750

Pachón-Morales J., Perré P., Casalinho J., Do H., Schott D., Puel F., Colin J., 2020a – *Potential of DEM for investigation of non-consolidated flow of cohesive and elongated biomass particles*, *Advanced Powder Technology* 31(4): 1500-1515

Pachón-Morales J., Colin J., Casalinho J., Perré P., Puel F., 2020b – *Flowability characterization of torrefied biomass powders: Static and dynamic testing*, *Biomass and Bioenergy* 138: 105608 13p.

Pierre F., Almeida G., Brito J., Perré P., 2011 – *Influence of torrefaction on some chemical and energy properties of maritime pine and pedunculate oak*, *Bioresources* 6: 1204-1218.

Pierre F., Almeida G., Brito J.O., Perré P., 2013 – *An original impact device for biomass characterisation: some results obtained for woods at different moisture contents*, *Wood Science and Technology* 47(3): 537-555

Pierre F., Almeida G., Colin J., Perré P., 2017 – *Reduction of biomass resilience by torrefaction: apparent stiffness during failure (ASF) and specific failure energy (SFE) assessed by a custom impact device*, *Holzforschung* 71(11): 863-872

Ramirez-Gomez A., 2016 – *Research needs on biomass characterization to prevent handling problems and hazards in industry*, *Particulate Science and Technology* 34(4): 432-44

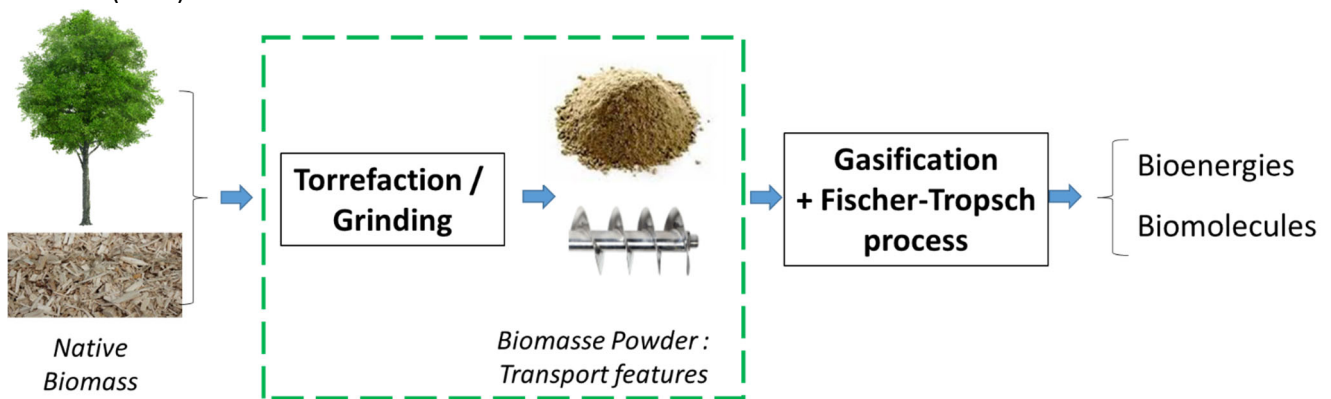
Stapf D., Ceceri G., Johansson I., Whitty K., 2019 – *Biomass pre-treatment for bioenergy: Case study 3 – Pretreatment of municipal solid waste (MSW) for gasification*, Published by IEA Bioenergy

**Valorisation of lignocellulosic biomass by dry process :  
Study of the flowability of torrefied biomass powders under unconfined flow conditions**

**PhD Proposal 2021**

**Scientific fields:** Thermochemical and particulate processes, Granular Matter, Physical Characterization, Imaging, Modelling, Numerical Calculation

**Key words:** Biomass, Torrefaction, Grinding, Particle Size Distribution, Powder flowability, Discrete Element Method (DEM)



**CONTEXT**

Lignocellulosic biomass is preferred over food-potential biomass because they offer the opportunity to create added value from crop residues or new crops. The combination of forest and agricultural biomasses is envisaged to feed industrial processing units in a safe and sustainable way. Finally, it is possible to mix native biomass and waste (Stappf et al. 2019). This production scheme makes it possible to preserve the areas necessary for food crops in order to ensure the imperative balance between food production and the production of goods and services. The industrial valorisation of lignocellulosic biomass is therefore a credible alternative to fossil carbon, without entering into direct competition with food productions.

One of the preferred conversion routes consists of gasification (to convert biomass into synthesis gas, CO and H<sub>2</sub>) followed by a Fischer-Tropsch synthesis (to produce organic molecules). This so-called dry route is complementary to the wet route: hydrolysis and fermentation. Prior to the thermochemical conversion phase, the lignocellulosic biomass must be reduced to powder by grinding to reach physical and energy qualities compatible with gasification. In particular, its particle size distribution must be reduced (to a few hundred micrometres) to increase its reactivity and its flowability, to facilitate its storage, transport and injection into the reactor. However, due to the fibrous nature of lignocellulosic biomass, this grinding stage is energy-intensive and compromises the economic relevance of this recovery method. In addition to improving the energy quality of the biomass by reducing the Oxygen/Carbon ratio, it is now accepted that torrefaction (mild pyrolysis under nitrogen) reduces the resilience of the biomass by altering its fibrous nature and therefore optimises the energy cost of grinding.

The flow properties of the powder after grinding are therefore modified by torrefaction. Thus the application of this pre-treatment is likely to favour or alter the flowability of the biomass, and therefore to suppress blocking points or, on the contrary, to generate storage, handling and injection difficulties within the industrial installations. Up to now, expertise is based mainly on experience and empiricism. Knowledge of granular media derived from biomass is still insufficient to be able to establish reliable laws of behaviour, enabling the design



and sizing of industrial equipment. A better understanding and prediction of the flow properties of these granular media is therefore essential.

The Process and Materials Engineering Department (Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux LGPM - Paris Saclay University-CentraleSupélec, France) has developed strong expertise in grinding coupled with biomass torrefaction. This expertise is available in two domains:

- Process downscaling using tools applicable on a laboratory scale,
- Characterisation of the pre-treated biomass (particle size measurement, hygrothermal, energetic, mechanical properties, etc.).

The subject proposed here is part of this second axis.

A first PhD study (Pachón-Morales, 2019) has recently allowed:

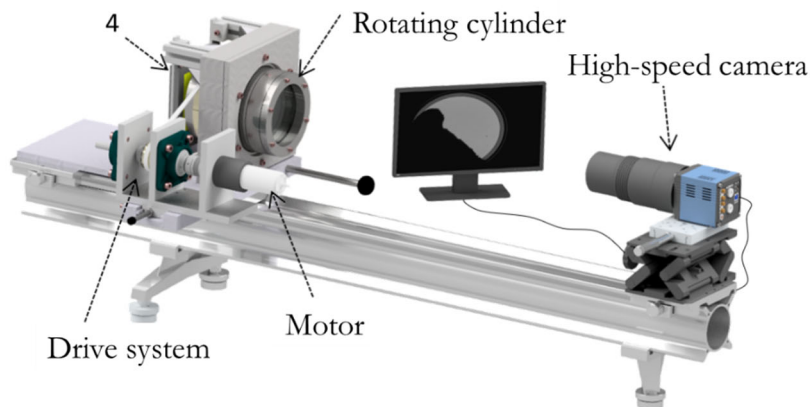
- to demonstrate that the more intense the torrefaction, the more regular the fracture habits are, thus increasing the flowability of the powders despite the reduction in the average grain size and the greater size polydispersity (Pachón-Morales et al. 2019a).
- that the criterion of mass loss used in torrefaction to characterise the intensity of thermal treatment can also be used to predict flowability after consolidated storage (Pachon et al. 2017).
- to implement a tool (rotating drum) for the characterisation of unconfined powder flow with milled, native and torrefied biomasses, as well as a data processing methodology adapted to the cohesive nature of these powders (Pachón-Morales et al. 2020b).
- To set up a DEM modelling tool for these powders composed of fibres or elongated fibre clusters (collaboration with the University TU Delft) (Pachón-Morales et al. 2019b, 2020a).

### AIMS

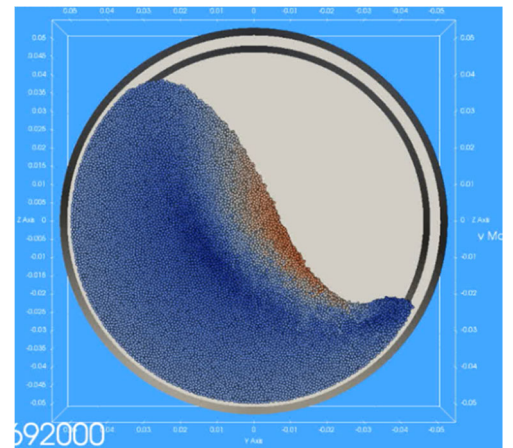
The general objective of the doctoral project is to study the unconfined flow properties of torrefied lignocellulosic biomass powders, whose particle size distribution complies with industrial specifications, and to relate the flowability characteristics to torrefaction and grinding conditions.

The doctoral project is divided in five parts:

1. A study of the milling of native and torrefied biomass powder will be carried out to investigate the impact of the operating parameters (duration, technology, bulk or classified powder) on the particle characteristics. The control of the particle characteristics will be then achieved.
2. Bulk Powder flowability will be measured in a rotating drum (unconfined flow) by analysing avalanching behaviour. The powders are of various origins (essence, torrefaction intensity, grinding conditions, sieving). This behaviour can then be related to the characteristics of the powders.
3. The avalanching profiles observed with biomass powders will be compared with those obtained with organic and/or mineral reference powders. This diversity will make it possible to propose a flowability indicator in unconfined flow, as it exists for confined flow.
4. The modelling of the flow of elongated particles will be carried out using a discrete element method (DEM), in order to reproduce the behaviour measured experimentally. A first step will be to increase the predictive character of the model by taking into account the interparticle electrostatic forces, in addition to the rolling, friction and cohesion energy forces already considered. In a second step, the simulator will be used to predict the impact of the size distribution and shape descriptors and the surface state of the particles separately.
5. The combination of the first three points will thus make it possible to optimise the torrefaction and grinding conditions in order to achieve flow properties compatible with industrial valorisation while ensuring the technical and economic relevance of the whole process.



*Rotating Drum : Experimental SetUp (in-house design)*



*DEM simulation results*

### WORK PLAN :

The main tasks of the course will therefore be :

- To produce powders to be analysed: sampling from untreated biomass, torrefaction, grinding, sieving,
- To characterise biomass powders (optical particle size measurement),
- To carry out flowability measurements in a rotating drum and to assess the results by means of image analysis (Matlab),
- To simulate biomass powder flows with the LIGGGHTS software,
- To valorise research results in the form of scientific articles in international peer reviewed journals

A literature review will also be requested from the doctoral student so that he or she can compare his or her results with those of the scientific community in the field.

### PRACTICAL ASPECTS

The 36-month PhD will take place on the Gif-sur-Yvette campus (91) within the LGPM. The doctoral student will carry out part of his or her experiments at the European Centre for Biotechnology and Bioeconomy (Pomacle, 51) where some of the LGPM's equipment is housed.

The doctoral student will have all the materials and human resources necessary for the running of his/her thesis. He or she will be able to rely on the skills of the laboratory, particularly in experimental design and in imaging. In addition, he or she will benefit from material and digital resources acquired and developed in the context of a previous doctoral study.

### DESIRED PROFILE

This thesis is aimed at graduated students of engineering schools and Master of Science in one of the following fields: Chemical Engineering, Mechanical Engineering, Materials Science or General Scientific Education. Experimental rigour is a necessary quality for the successful completion of this work. The applicant is also expected to be dynamic and show curiosity, initiative, critical analysis and autonomy. The candidate must demonstrate an interest in digital sciences (image analysis, simulation).

Fluency in English is required.

Good interpersonal skills are also required, enabling rapid integration into the laboratory.

### SUPERVISORS ; HOW to APPLY

François PUEL, Professor (06 65 58 58 64); [francois.puel@centralesupelec.fr](mailto:francois.puel@centralesupelec.fr)

Julien COLIN, Senior Lecturer (01 75 31 60 04) [julien.colin@centralesupelec.fr](mailto:julien.colin@centralesupelec.fr)

The application, including a detailed Resume, a covering letter and a transcript of records (marks/grades) for the last two years, should be submitted to

[https://www.adum.fr/as/ed/voirproposition.pl?site=PSaclay&matricule\\_prop=34290](https://www.adum.fr/as/ed/voirproposition.pl?site=PSaclay&matricule_prop=34290)





## REFERENCES

- Almeida G., Brito J.O., Perré P., 2010 – *Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: the potential of mass loss as a synthetic indicator*, *Bioresource Technology* 101(24): 9778-9784
- Almeida G., Santos D.V.B., Perré P., 2014 – *Mild Pyrolysis of fast growing wood species (caribbean pine and rose gum) : dimensional changes predicted by the global mass loss*, *Biomass and Bioenergy* 70: 407-415
- Cavagnol S., Sanz E., Nastoll W., Roesler J.F., Zyma V., Perré P., 2013 – *Inverse analysis of wood pyrolysis with long residence times in the temperature range 2010-209°C: selection of multi-step kinetic models based on mass loss residues*, *Thermochemica Acta* 574: 1-9
- Dai J., Cui H., Grace J.R., 2012 – *Biomass feeding for thermochemical reactors*, *Progress in Energy and Combustion Science* 38: 716-726
- Illic D., Williams K., Farnish R., Webb E., Liu G., 2018 – *On the challenges facing the handling of solid biomass feedstocks*, *Biofuels, Bioproduction Biorefinery* 12(2): 1-16
- Pachón-Morales J., Colin J., Pierre F., T. Champavert, Puel F., Perre P., 2017 – *Flowability of lignocellulosic biomass powders: influence of torrefaction intensity*, *EPJ Web of Conferences* 140:4p.
- Pachón-Morales J., Colin J., Pierre F., Puel F., Perré P., 2019a – *Effect of torrefaction intensity on the flow properties of lignocellulosic biomass powders*, *Biomass and Bioenergy* 120: 301-312
- Pachón-Morales J., Do H., Colin J., Puel F., Perré P., Schott D., 2019b – *DEM modelling for flow of cohesive lignocellulosic biomass powders: Model calibration using bulk tests*, *Advanced Powder Technology* 30(4): 732-750
- Pachón-Morales J., Perré P., Casalinho J., Do H., Schott D., Puel F., Colin J., 2020a – *Potential of DEM for investigation of non-consolidated flow of cohesive and elongated biomass particles*, *Advanced Powder Technology* 31(4): 1500-1515
- Pachón-Morales J., Colin J., Casalinho J., Perré P., Puel F., 2020b – *Flowability characterization of torrefied biomass powders: Static and dynamic testing*, *Biomass and Bioenergy* 138: 105608 13p.
- Pierre F., Almeida G., Brito J., Perré P., 2011 – *Influence of torrefaction on some chemical and energy properties of maritime pine and pedunculate oak*, *Bioresources* 6: 1204-1218.
- Pierre F., Almeida G., Brito J.O., Perré P., 2013 – *An original impact device for biomass characterisation: some results obtained for woods at different moisture contents*, *Wood Science and Technology* 47(3): 537-555
- Pierre F., Almeida G., Colin J., Perré P., 2017 – *Reduction of biomass resilience by torrefaction: apparent stiffness during failure (ASF) and specific failure energy (SFE) assessed by a custom impact device*, *Holzforschung* 71(11): 863-872
- Ramirez-Gomez A., 2016 – *Research needs on biomass characterization to prevent handling problems and hazards in industry*, *Particulate Science and Technology* 34(4): 432-44
- Stapf D., Ceceri G., Johansson I., Whitty K., 2019 – *Biomass pre-treatment for bioenergy: Case study 3 – Pretreatment of municipal solid waste (MSW) for gasification*, Published by IEA Bioenergy