

Analyse de la résistance d'un caisson de vidage horizontal (approche par éléments finis - SPH)

M. Sc. Y. VAISSAUD
HENALLUX - Pierrard – Virton

Afin d'estimer la résistance du caisson d'un nouveau système horizontal de déchargement d'une semi-remorque, deux étapes de simulation ont été réalisées. Tout d'abord, la méthode SPH (Smoothed Particle Hydrodynamic) a simulé le phénomène de décharge et la distribution de la pression de la terre écrasée contre la benne a été récupérée. Ensuite, on a appliqué la distribution de pression extraite de la simulation SPH comme condition de chargement dans la simulation FEM (Finite Element Method) du caisson de la semi-remorque : la résistance mécanique de ce dernier a été constatée comme suffisante.

Mots-clefs : éléments finis, SPH (Smoothed Particle Hydrodynamic), CEL (coupled Euler Lagrangien), terre

In order to estimate the casing strength of a new horizontal semi-trailer unloading system, two simulation steps were performed. First, SPH (Smoothed Particle Hydrodynamic) was performed to simulate the phenomenon of unloading and to obtain the pressure distribution of soil compaction against the casing. Then, the pressure distribution extracted from the SPH simulation is applied as the loading conditions of the FEM (Finite Element Method) of the casing: its mechanical strength was confirmed.

Keywords: Finite Element Method, SPH (Smoothed Particle Hydrodynamic), CEL (coupled Euler Lagrangian), soil

1. Contexte

Cette recherche a été menée dans le cadre du projet DeltoPull. Il est réalisé au sein d'une collaboration entre les centres de recherche CeREF et FoRS, les partenaires industriels DTM et Hoslet, et le Pôle de Compétitivité Logistics in Wallonia.

Le projet vise notamment à construire des prototypes de semi-remorque équipés d'un bouclier qui coulisse le long du caisson de la semi-remorque pour assurer la décharge du contenu (voir figure 1). Ce système de décharge, alternative du bennage, présente l'avantage de réduire le risque de basculement.

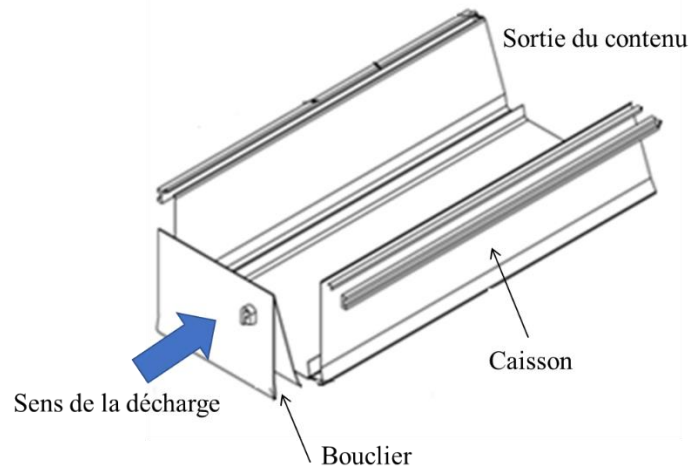


Figure 1 : schéma de la semi-remorque (CeREF)

Un défi du projet consiste à concevoir cette semi-remorque pour un chargement de 50 t. Ce faisant, il est nécessaire de vérifier la résistance mécanique du caisson à toutes les sollicitations.

Ce caisson présente un grand volume pour transporter et translater horizontalement des déchets volumineux, mais il est également conçu pour transporter des matériaux denses tels que la terre. Ces matériaux sont plus difficiles à décharger et exercent localement une pression importante sur la structure du caisson.

La distribution de charge la plus contraignante pour la structure est attendue au début de la décharge avec de la terre [2]. Cette étape doit donc être simulée de manière précise pour garantir la résistance mécanique du caisson (respect de la limite élastique de l'acier).

2. Objectif et approche

L'objectif de cette étude est de vérifier la résistance mécanique du caisson avec un déchargement de terre en utilisant la méthode des éléments finis.

Pour évaluer l'effet des sollicitations sur la structure, il convient d'en déterminer l'origine et de les quantifier. Celles qui sont dues à la terre génèrent des contraintes via deux mécanismes :

- la réaction entre le bouclier et la terre compactée ;
- la friction entre de la terre et le caisson.

La terre a un comportement non linéaire complexe (plastique). De plus, elle est soumise à une très grande déformation en cisaillement et en compression, ce qui implique de l'analyser sous l'hypothèse des grandes déformations. A contrario, l'analyse de la résistance mécanique du caisson par FEM utilise l'hypothèse de petites déformations. Comme ces hypothèses de déformation présentent des ordres de grandeur différents, l'utilisation d'une seule méthode pour l'ensemble est irréaliste. C'est pourquoi l'analyse est divisée en deux étapes, pour ne modéliser qu'un seul phénomène à chaque étape.

Etape 1 : Calcul de la pression sur la surface du caisson au démarrage

Le bouclier pousse la terre. Le caisson et le bouclier sont modélisés avec des éléments rigides dans le logiciel ABAQUS. Ces calculs avec des éléments rigides sont plus rapides qu'avec des éléments solides déformables. À partir de ces calculs, les résultats permettent de constater l'évolution temporelle de la résultante de la pression exercée sur le bouclier par la terre, et de sélectionner le moment où la sollicitation est la plus importante au démarrage. Ensuite, la distribution de la pression de la terre sur la surface du caisson est extraite pour l'étape suivante.

Etape 2 : Calcul de la résistance structurelle

La charge créée par la terre concassée, calculée à l'étape précédente, est appliquée sur la surface de la structure du caisson. La géométrie du caisson est discrétisée en utilisant les éléments de coque dans le logiciel ABAQUS. Le calcul des éléments finis permet de connaître la répartition des contraintes au sein du caisson.

3. Calcul de la pression sur la surface du caisson au démarrage

3.1. Choix des éléments finis et de leurs paramètres

Pour cette première étape, le modèle est constitué de trois parties : le caisson est rigide (analytical rigid dans ABAQUS), le bouclier est rigide (discrete rigid dans ABAQUS) et la terre est déformable (solide 3D). La terre est poussée par le bouclier, qui translate horizontalement au sein du caisson. Elle se compacte et glisse une fois que la force tangentielle dépasse sa limite de friction (tangential friction dans ABAQUS).

La charge statique du chargement de terre (au total 32 tonnes) est répartie initialement de manière homogène sur la surface horizontale du caisson. Après son tassement, on applique le déplacement horizontal du bouclier à une vitesse constante (0,05 m/s).

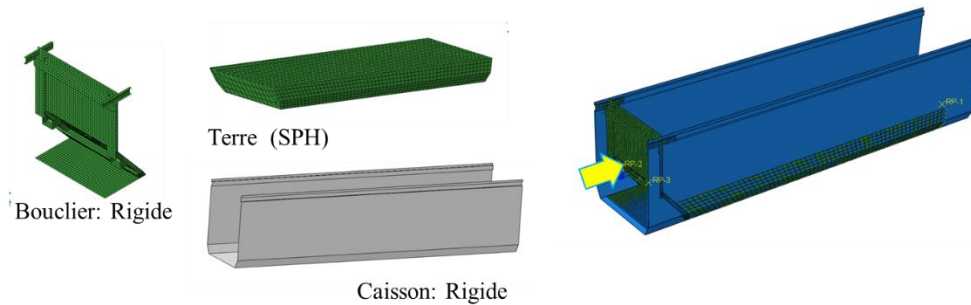


Figure 2 Assemblages dans le modèle SPH

3.2. Propriétés mécaniques de la terre

Selon l'expérience des partenaires du projet, le contenu du caisson le plus difficile à décharger est un mélange d'argile et de sable, qui présente la caractéristique d'être très collant. Il est également possible que la terre humide et compactée puisse coller, comme le montre la figure 3 [3].



Figure 3 : Terre mouillée collée sur la benne (photo par Hoslet, DTM)

Ceci peut être expliqué par la cohésion élevée entre les particules de terre humide [4]. En raison de la capillarité, il est possible que les particules de terre adhèrent les unes aux autres et augmentent ainsi la résistance au cisaillement. Elles adhèrent aussi sur la paroi et augmentent ainsi la friction statique entre la terre et le caisson [5].

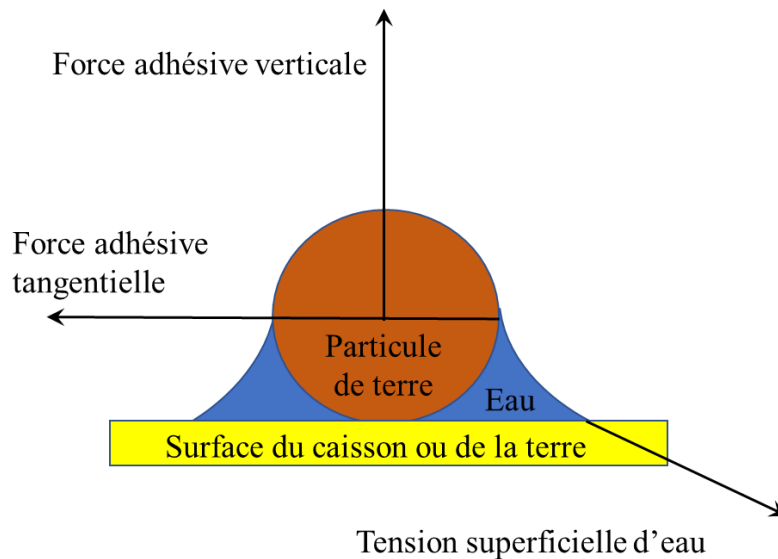


Figure 4 : La force adhésion 'appartenant' de la terre en ajoutant l'eau [5]

La terre est un matériau dont le comportement mécanique est très variable en fonction de son état (humidité, compaction), de sa granulométrie (sable, argile,

limon) et il en résulte des propriétés mécaniques très diverses. La littérature scientifique fournit la distribution des propriétés suivante [6-8].

- Module de Young : 5-40 MPa
- Cohésion : 0-100 kPa
- Angle de friction : 15-40

Afin de trouver les valeurs des ces caractéristiques générant des comportements cohérents avec des observations d'un déchargement, le paramètre « cohésion » de la terre dans la loi de Mohr-Coulomb et le coefficient de frottement sont choisis comme décrit au tableau 1.

Dans ce tableau, la terre cohésive représente le mélange argile-sable ou de la terre humide, et la terre non cohésive représente la terre très sèche sans cohésion, comme le sable. Ces propriétés sont cohérentes avec la littérature [9]. Le coefficient de friction varie entre 0,1 et 0,5, afin d'évaluer l'impact de la friction de surface sur la force à appliquer au bouclier [5].

Tableau 1 Coefficients du calcul SPH

Modèle	1 : terre non cohésive		2 : référence : terre cohésive		3 : terre cohésive avec friction élevée	
Cohésion [MPa]	0,0003	0,0003	0,03	0,03	0,03	0,03
Déformation plastique absolue [-]	0	0,1	0	0,1	0	0,1
Coef. de friction	0,1		0,1		0,5	

3.3. Choix de la méthode de simulation de la terre

La méthode la plus couramment utilisée pour simuler le comportement de la terre est la méthode CEL (Coupling Euler Lagrangean). Elle permet de modéliser la zone déformable à grande échelle avec des éléments eulériens (terre), et de la coupler avec des éléments lagrangiens présentant uniquement un mouvement de corps rigide (caisson, bouclier). Le résultat de la simulation est sensible à la taille du maillage eulérien : si le maillage n'est pas assez fin à l'interface de contact avec la région lagrangienne (c'est-à-dire le bouclier), des fuites se produisent et le phénomène n'est pas modélisé correctement.

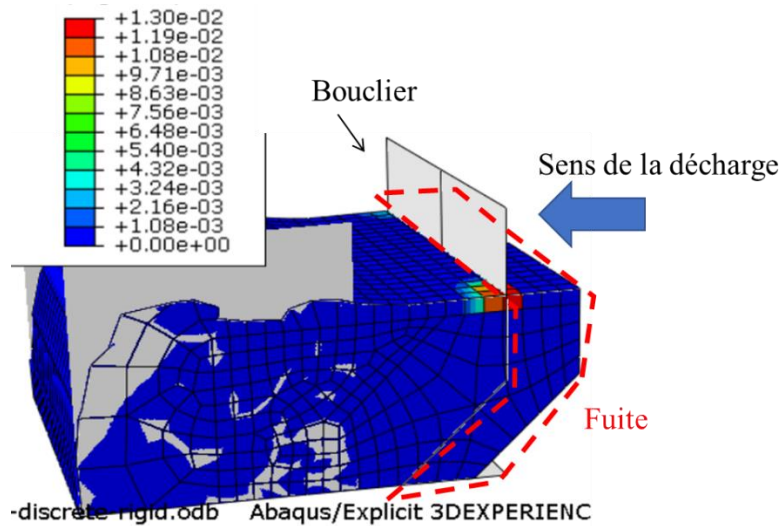


Figure 5 : Déformation plastique montrant la fuite de terre suite au mouvement du bouclier simulé en CEL

Afin d'éviter ce problème numérique, la terre est modélisée par la méthode SPH (smoothed particle hydrodynamic) [9]. Avec celle-ci, seule la densité des particules est considérée dans l'espace et il est possible d'éviter des fuites. Bien que la méthode SPH ait été développée principalement pour la CFD (Computational Fluid Dynamics), elle peut également être combinée avec d'autres modèles physiques. En plus, ABAQUS comprend une option permettant de convertir un maillage d'éléments finis solides 3D en un espace discrétisé pour SPH avec une densité de particules paramétrée. Cette application simplifie considérablement la discrétisation. Le critère de conversion du maillage en FEM au maillage SPH est fixé à 0,0005 en déformation.

3.4. Résultats

Les parties à gauche des figures 6-8 montrent l'aspect de chargement déformé après 2 secondes de démarrage pour chacun des trois modèles du tableau 1. La terre non cohésive du modèle 1 (figure 6) s'étale comme un liquide (ou une boue). Dans le modèle 3 (figure 8), la terre s'écrase, et dans le modèle 2 (figure 7), la terre glisse sans trop être écrasée.

Les parties à droite des figures 6-8 montrent l'évolution de la force de réaction horizontale sur le bouclier pour ces 3 modèles de terre. Avec un frottement élevé comme dans le modèle 3, le bouclier avance en écrasant la terre jusqu'à la fin du temps de simulation. Concernant le modèle 2 (figure 7), on observe dans un premier temps

l'écrasement de la terre (de 1 à 5 secondes, donc 200 cm de déplacement). Ensuite, la déformation de la terre contre le bouclier se stabilise, et ce dernier commence à faire glisser la terre de manière stable (déchargement proprement dit).

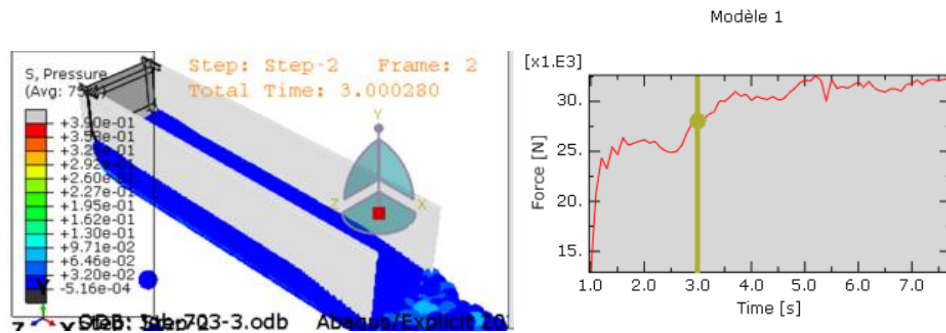


Figure 6 : Déformation de la terre non cohésive et évolution de la force de réaction horizontale

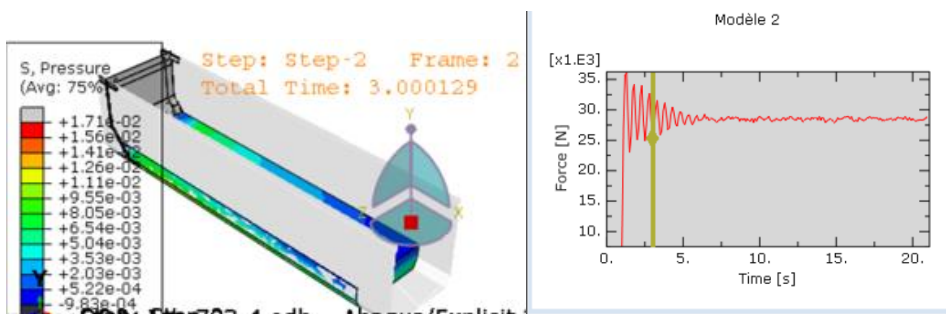


Figure 7 : Déformation de la terre cohésive, et évolution de la force de réaction horizontale

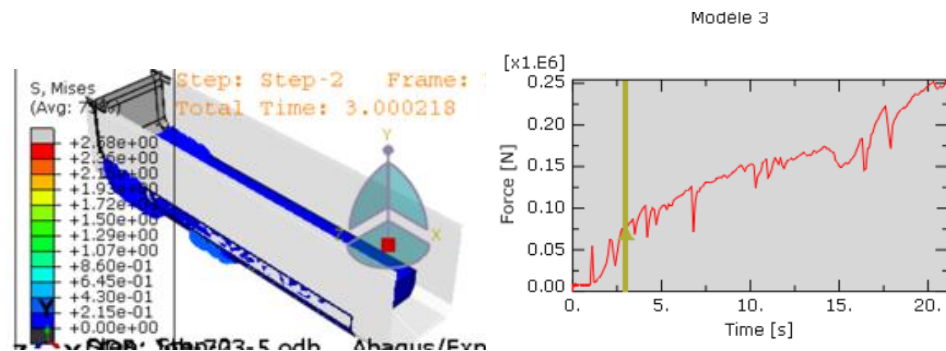


Figure 8 : Déformation de la terre cohésive avec le frottement élevé et évolution de la force de réaction horizontale

Suivant des observations réalisées lors de déchargements d'un petit prototype de caisson (figure 9), le bouclier écrase une mince tranche de terre avant que le chargement entier ne commence à glisser. L'aspect et la déformation de la terre du modèle 2 semblent cohérents avec cette observation : c'est donc ce modèle (la terre cohésive à faible friction) qui est utilisé pour la suite de l'analyse.



Figure 9 : Terre écrasée dans le poussoir précédent chez DTM

4. Calcul de la résistance structurelle

4.1. Modélisation en coque

Du fait de la construction du caisson est en tôles soudées, la méthode la plus pertinente pour le modéliser en éléments finis est d'utiliser les éléments de coques dans le logiciel ABAQUS.

Les éléments utilisés sont des éléments à intégration réduite, principalement rectangulaires (S4R dans ABAQUS). La taille de la maille est choisie entre 20 et 50 mm pour garder la même précision qu'une étude précédente [1].

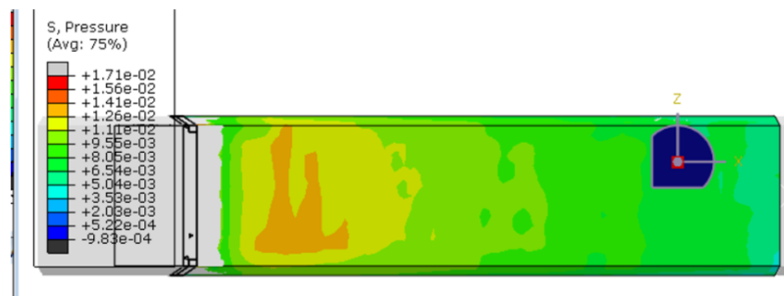


Figure 10 : Distribution de pression appliquée au modèle coque (répartition de la pression de contact du modèle 2 sur le fond du caisson)

4.2. Distribution de la charge à appliquer pour l'analyse de résistance

La distribution de pression appliquée au caisson provient des résultats du modèle 2, au moment du maximum de la résultante obtenue au bouclier (à environ 2,5 secondes, voir figure 10).

4.3. Conditions aux limites

Les conditions limites de fixation sont visibles sur la figure 11. Un point à la position de la sellette (fixation de la semi-remorque et du tracteur) est fixé ($U_x, U_y, U_z=0$) à gauche dans la figure. Les 12 sections fixées à droite de la figure représentent les points de fixation des trois essieux.

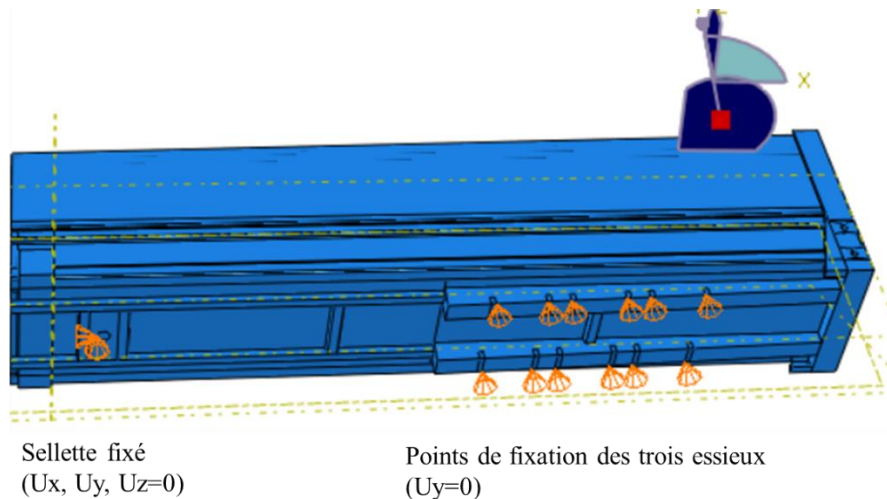


Figure 11 : Conditions aux limites du caisson (1 point à gauche : sellette, 12 points à droite : base des essieux)

4.4. Résultats

Le modèle contenant des éléments de contact et un comportement non-linéaire de la géométrie (dû à sa taille importante), la charge est appliquée progressivement dans les calculs pour aider la convergence. Le calcul s'arrête avant l'application de la totalité de la charge pour atteindre 77,5%. Afin d'estimer la contrainte à 100 % de la charge, la contrainte est divisée par un coefficient de 0,775.

Le critère de Von Mises est un peu plus précis que le critère de Tresca pour les matériaux ductiles : c'est donc le premier qu'on utilise ici. Le résultat de la simulation dans la figure 12 montre deux zones où les contraintes de Von Mises atteignent 373

MPa. Elles se situent au niveau de la sellette, à l'avant du caisson : en effet, le poids de la moitié du chargement doit être repris par un seul appui.

Pour renforcer la sellette, on ajoute 2 supports en forme de triangle (voir la figure 12). Cela permet de réduire la contrainte de 373MPa à 308 MPa (soit 82%). En utilisant la nuance d'acier S355, qui présente une limite élastique de 355 MPa, la contrainte maximale ne dépasse pas cette limite.

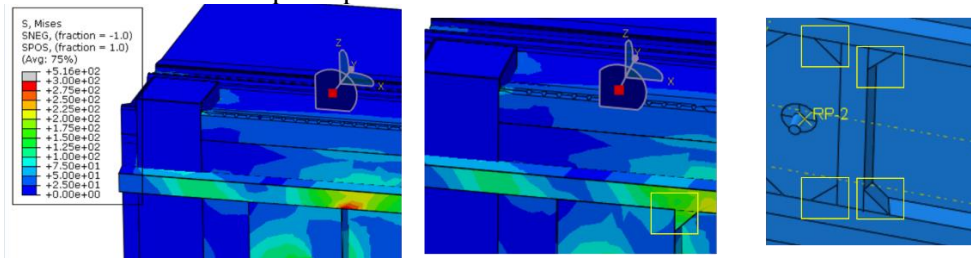


Figure 12 : Structure autour de sellette et proposition d'amélioration

5. Conclusion et perspectives

Afin d'analyser la résistance mécanique du caisson du poussoir, cette étude numérique est menée en deux étapes.

La première étape permet d'obtenir, à partir du mouvement du bouclier au moment du déchargement, la distribution de pression que la terre exerce sur le caisson de la semi-remorque. La résultante reprise par le bouclier provient de la résistance de la terre écrasée et de la force de friction.

Ensuite, le résultat du calcul de cette première étape permet d'analyser la résistance mécanique structurelle du caisson. Le résultat montre que la plus forte contrainte apparaît autour du support de la sellette. Une amélioration structurelle est proposée pour réduire de 20% la contrainte sur ce support, autorisant l'utilisation d'acier S355.

La suite du projet permettra de finaliser le design du caisson en optimisant la résistance structurelle pour des cas de charge différents (variété de terre, charge, vitesse de déchargement). Un prototype réel permettra également de confirmer le design.

6. Remerciements

Ce projet est financé par la Région Wallonne. Je tiens à remercier le Pôle de Compétitivité Logistics in Wallonia pour son soutien financier et administratif à ce projet. Je tiens également à remercier notre partenaire académique (CeREF) et les entreprises DTM et Hoslet pour leur étroite collaboration.

7. Sources

- [1] SZULGA, F., HERPOEL, T., VAISSAUD, Y., *Développement d'une semi-remorque 50 tonnes polyvalente avec vidage horizontal rapide*, Acte de conférence ou de colloque de JdCHE 2020.
- [2] Delto-Pull, FoRS, Hoslet , CeREF, *RAPPORT SEMESTRIEL : LiW_Delto-Pull - Convention n° 8098 , Pôle Logistics In Wallonia– Appel N° 25 Semestre n° 3 - Période couverte : du 01/05/2020 au 31/10/2020*
- [3] *PV projet Deltopull : LiW_Delto-Pull PV du comité de pilotage de fin du premier semestre*, 25/10/2019
- [4] CHENG, J., ZHENG, K., XIA, J., LIU, G.; JIANG, L., LI, D., *Analysis of Adhesion between Wet Clay Soil and Rotary Tillage Part in Paddy Field Based on Discrete Element Method.* , Processes, 2021, 9, 845.
- [5] ZHANG, J., *Recherche sur les mécanismes d'adhésion de la terre*, Thèse master : Département bioressources de l'Université de Mie (Japon), Septembre 2013
- [6] CHMELNIZKIJ, A., NAGULA, S., GRABE, J., *Numerical simulation of dynamic compaction in Abaqus/CEL and MPM*, 2nd International Conference on the Material Point Method for Modelling Soil-Water-Structure Interaction, 2019
- [7] RAJAGOPAL, A., February 16, 2017, *Tire-Soil Interaction Modeling with Abaqus*
<https://blogs.3ds.com/simulia/tire-soil-interaction-modeling-with-abaqus/>
- [8] MIZONO, E., CHEN, W. F., *Plasticity Models for soil*, *North American Workshop on Limit Equilibrium*, Plasticity and Generalized Stress-Strain in geotechnical Engineering, 1980
- [9] Dassault, *ABAQUS aide SPH*