

---

# Comportement d'un milieu granulaire à l'interface avec une paroi – Influence de la rugosité

**Khadija EL CHEIKH** <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire LGCgE, Université d'Artois, IUT de Béthune, Département Génie Civil, 1230 Rue de l'Université, 62408 Béthune

<sup>2</sup> Laboratoire LGCgE, Ecole des Mines de Douai, Département Génie Civil et Environnemental, 764 Bd Lahure, 59500 Douai

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

---

*RÉSUMÉ. La prédiction de la pression de pompage, le dimensionnement des coffrages et la qualité des parements dépendent du frottement du béton frais contre la paroi. Près de l'interface béton – paroi, une couche de faible épaisseur se forme. Cette couche est appelée « couche limite ». Expérimentalement, la caractérisation de la couche limite et la compréhension des mécanismes menant à sa formation présentent des difficultés. L'objectif de cette étude est de comprendre les phénomènes se produisant à l'interface à l'échelle des grains. Toutefois, compte tenu de la complexité des deux corps en contact : couche limite et paroi, le système étudié est simplifié. L'étude repose sur l'utilisation d'un dispositif expérimental et d'un modèle numérique. Avec l'approche expérimentale, les mécanismes intervenant à l'interface d'un empilement monodisperse cisailé sur une baguette crénelée sont étudiés. Suite à la validation du modèle numérique utilisé, des simulations sur un empilement monodisperse en conditions périodiques sont réalisées. L'objectif de l'étude numérique est d'étudier l'influence des conditions à l'interface, en particulier la rugosité, sur le comportement d'un milieu granulaire près d'une paroi.*

*ABSTRACT. The prediction of the pumping pressure, the formwork design and the quality of concrete surfaces depend on fresh concrete – wall friction. At the interface concrete – wall, a layer is formed. This layer is called “boundary layer”. Experimentally, it is difficult to characterize this layer and to understand the mechanisms leading to its formation. This study aims at understanding the wall-concrete interface phenomena at a grain scale. However, due to the complex nature of the two bodies in contact: boundary layer and wall, a simplified system has been considered. The study is based on the use of an experimental device and a numerical model. With the experimental approach, the mechanisms occurring at the interface of a stack of monodispersed beads sheared on a moving plane are studied. Following numerical model validation, simulations in periodic conditions are performed on monodispersed stacks. The aim of the numerical approach is to study the effect of the interface conditions, in particular the roughness, on the granular media behavior near the wall.*

*MOTS-CLÉS : Rugosité, Interface, Granulaire, Frottement, Couche limite, DEM.*

*KEY WORDS: Roughness, Interface, Granular, Friction, Boundary layer, DEM.*

---

## 1. Introduction

La prédiction de la pression de pompage, le dimensionnement des coffrages et la qualité des parements des bétons constituent un enjeu économique important. En plus des propriétés rhéologiques du béton mis en place, plusieurs études ont montré que ces trois éléments (pompage, poussée et défauts de parements) sont liés au frottement du béton contre la paroi et aux conditions à l'interface béton – paroi [DJE 04, KAP 00, LIB 06].

L'étude de l'influence des conditions à l'interface béton – paroi sur le frottement du béton contre la paroi se fait avec des tribomètres. Ces appareils consistent à cisailier le béton frais par un déplacement de la paroi en contact avec le béton. Près de la paroi en mouvement, plusieurs auteurs ont mis en évidence l'existence d'une couche de faible épaisseur, appelée couche limite. Cette couche est constituée de fines (ciment et additions minérales) et d'eau. Kaplan [KAP 00] a montré que durant l'écoulement du béton, le cisaillement s'effectue principalement dans la couche limite et que, loin de la paroi le béton avance en bloc [Figure 1-a]. Les essais tribologiques [DJE 04] menés ont montré également que le frottement à l'interface béton – paroi dépend essentiellement de la composition du béton, de la vitesse de déplacement de la paroi, de la pression normale, de la rugosité de la surface en mouvement et des propriétés rhéologiques de la couche limite. Les résultats obtenus par Vanhove [DJE 04] ont montré que la rugosité de la paroi influe sur le frottement lorsque le béton suit un comportement granulaire. En effet, Vanhove a supposé que la phase liquide initialement emprisonnée à l'interface béton – paroi migre dans l'échantillon sous l'effet de la pression normale appliquée sur le béton. Dans ce cas, les grains viennent au contact des aspérités de la paroi conduisant à un frottement plus important pour une rugosité plus élevée.

Malgré les avancées réalisées, la littérature n'apporte pas de réponses précises sur les caractéristiques de la couche limite (son épaisseur, les mécanismes de sa formation, etc.). Mais, la réalisation d'une telle étude nécessite une analyse à l'échelle des grains constituant la couche limite. Expérimentalement, il est difficile d'étudier le comportement du béton près de la paroi et d'analyser les résultats à l'échelle des particules fines pour comprendre les phénomènes présents à l'interface béton – paroi. En effet, cette interface est un système tribologique formé des deux corps en contact complexes [Figure 1-b]. La complexité de la couche limite réside dans ses multiples composants en suspension et la paroi qui est formée par des aspérités irrégulières.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'influence de la rugosité sur le comportement de la couche près de l'interface pour un béton qui suit un comportement granulaire lors du cisaillement. La complexité des deux corps en contact nous a amenés à simplifier les deux matériaux en contact et à étudier les mécanismes intervenant à l'interface d'un milieu granulaire cisailé sur une paroi rugueuse. Un modèle analogique simplifié de l'interface béton – paroi est proposé [Figure 1-c]. A partir de ce modèle analogique, un dispositif expérimental a été conçu et réalisé dans le cadre de notre étude. De plus, une modélisation par la méthode des éléments discrets dudit modèle a été proposée. Le dispositif expérimental permet d'étudier les phénomènes présents à l'interface milieu granulaire – paroi rugueuse et de valider le modèle numérique utilisé. L'avantage de la modélisation est de contourner les limites expérimentales et d'étudier l'influence d'une rugosité plus proche de la réalité sur le comportement à l'interface milieu granulaire – paroi. A partir des simulations numériques, les mécanismes à l'échelle granulaire du béton près d'une surface rugueuse sont étudiés.

## 2. Modèle analogique

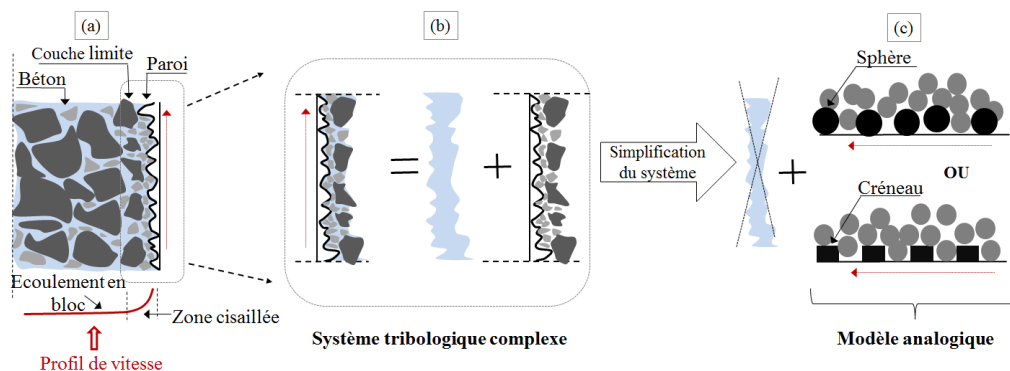


Figure 1. (a,b) Représentation schématique de l'interface béton – paroi et (c) modèle analogique.

La simplification de l'interface béton – paroi a été réalisée en prenant des hypothèses à la fois sur le matériau béton et sur la rugosité de la paroi. En effet, dans un comportement granulaire, le frottement est principalement régit par les contacts entre les grains et les aspérités. Pour étudier un tel comportement, la présence du fluide interstitiel peut être négligée. Dans nos simulations, des particules sphériques sont étudiées. Toutefois la résistance au roulement qui pourrait provenir d'une forme complexe est prise en compte de manière simplifiée par un coefficient de roulement entre particules. En ce qui concerne la polydispersité des grains du béton, son influence sur le comportement granulaire près de la paroi n'est pas présentée ici. Dans cette étude nous nous focalisons sur le rapport entre la taille moyenne des grains du milieu et les aspérités de la paroi. Avec ces différentes hypothèses, il est possible de réduire la complexité du béton, en considérant que ce milieu est constitué de grains sphériques monodisperses (grains de même taille) et sans cohésion. La rugosité de la paroi formée en réalité par des aspérités irrégulières, est représentée dans cette étude par une paroi rugueuse constituée de géométries simples de type « créneaux » ou « sphères » [Figure 1-c]. La forme en créneaux de la rugosité est étudiée dans l'approche expérimentale. Par contre, la modélisation de la rugosité irrégulière a été réalisée par la méthode aux éléments discrets en forme de sphères.

### 3. Dispositif expérimental

La Figure 2 présente un schéma du dispositif expérimental monté sur le tribomètre. Ce dispositif est constitué d'une boîte parallélépipédique munie à sa base d'une baguette crénelée. Des billes de verre sont introduites dans la boîte par couches (compacité  $\phi \approx 0,6$ ). Un couvercle et des masses peuvent être ajoutés sur l'empilement permettant d'appliquer une pression normale. Le milieu constitué de 6450 billes est ensuite cisailé par déplacement de la baguette. L'empilement initial est composé de trois colonnes de billes de deux couleurs différentes. Cette disposition permet d'étudier le profil de cisaillement du milieu granulaire. La taille des billes (10 mm de diamètre), la vitesse de déplacement de la baguette (5 mm/s) et les parois en plexiglass facilitent l'observation du mouvement de billes lors du déplacement de la paroi rugueuse. Trois rugosités ont été étudiées en faisant varier les dimensions des créneaux et la distance séparant deux créneaux successifs [Figure 2]. Le choix des dimensions de créneaux est basé sur la possibilité des billes de se loger ou non entre deux créneaux. Les trois rugosités sont notées respectivement R1, R2 et R3 [Figure 2]. Pour différentes pressions normales appliquées sur la baguette, la force de frottement entre le milieu granulaire et la baguette est mesurée par un capteur de force. Elle est calculée dans un régime dynamique au cours duquel la force mesurée oscille autour d'une valeur moyenne. Cette force est nommée « force tangentielle ». Des essais non présentés ici ont montré que la vitesse de déplacement de la baguette (1 à 10 mm/s) n'influe pas sur la force tangentielle.

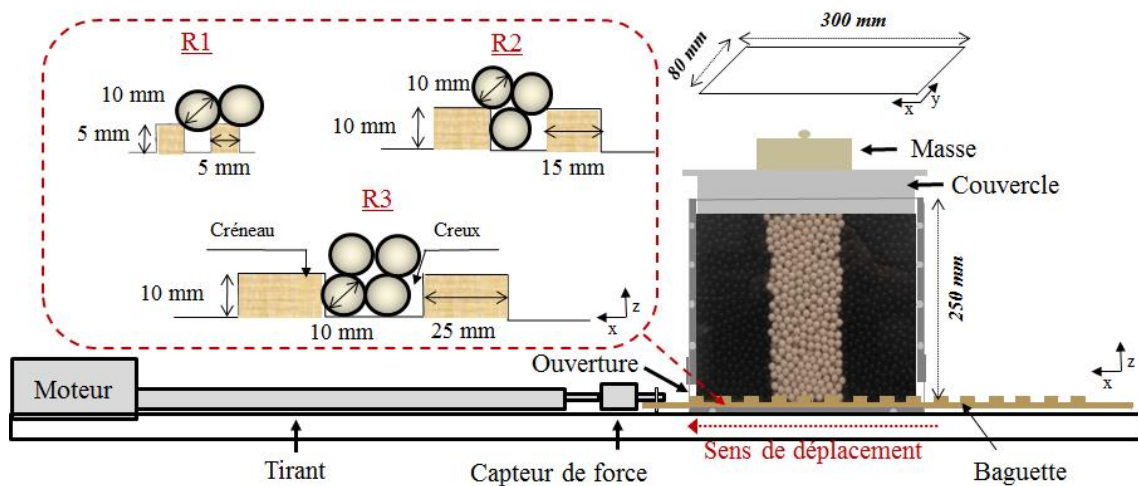


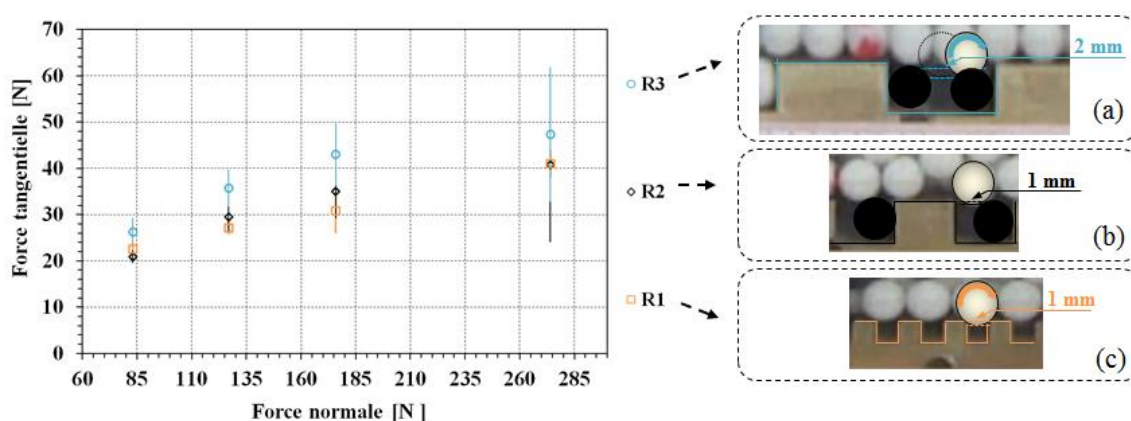
Figure 2. Schéma du dispositif expérimental monté sur le tribomètre.

#### 3.1 Résultats expérimentaux : Influence de la rugosité sur la force tangentielle

La Figure 3 présente la variation de la force tangentielle en fonction de la force normale pour les trois baguettes R1, R2 et R3. La force normale varie entre 85 N (poids propre des billes) et 275 N, ce qui correspond à une pression normale comprise entre 3,5 et 11,5 kPa. Chaque point de la courbe et chaque barre d'erreur représente respectivement la moyenne et l'écart type sur trois mesures. La force tangentielle augmente avec l'augmentation de la force normale. Pour une force normale appliquée sur la baguette de 275 N, l'écart entre les

trois mesures du même essai dépasse 10%, la reproductibilité de l'essai n'est alors pas assurée. Cet écart est dû aux blocages de billes sortant de la boîte. Nous remarquons que pour les baguettes R1 et R2, la différence de la force tangentielle n'est pas notable. En revanche, la force tangentielle exercée sur la baguette R3 est plus élevée que celles exercées sur R1 et R2. Afin d'expliquer l'influence de la rugosité sur la force tangentielle, pour chaque rugosité, nous avons décrit les mécanismes observés à l'interface billes-baguette. Les mécanismes sont décrits en utilisant le logiciel d'analyse d'images FIJI/ImageJ [RAS].

Dans la configuration initiale les billes près de l'interface se positionnent dans des creux d'une profondeur de 1 [Figure 3-b-c] ou 2mm [Figure 3-a]. Un creux est la distance d'enfoncement d'une bille entre deux créneaux, une bille et un créneau ou entre deux billes. Lorsque la baguette R1 se déplace, chaque bille franchit systématiquement 60 creux de profondeur de 1 mm [Figure 3-c] et 60 créneaux. Dans le cas de la rugosité R2, chaque bille de la première couche dépasse 21 creux de profondeur de 1 mm [Figure 3-b] et 21 créneaux. Les obstacles franchis n'ont pas engendré une variation de la force tangentielle par comparaison avec celle de R1. Pour la rugosité R3, la bille franchit un creux de profondeur de 2 mm [Figure 3-a] formé par deux billes logées entre deux créneaux (12 creux, 12 créneaux). Il semble qu'extraire une bille d'un creux de profondeur 2 mm provoque un désordre près de l'interface qui pourrait nécessiter une force plus importante que de multiples franchissements d'obstacles réduits (cas des baguettes R1 et R2).



**Figure 3.** Variation de la force tangentielle en fonction de la force normale pour R1, R2 et R3.

#### 4. Résultats numériques

Les essais réalisés sur le dispositif expérimental ont permis de décrire les mouvements des billes près de la paroi rugueuse. Toutefois, les mécanismes observés sont affectés par les parois latérales et l'accès à la microstructure présente des difficultés. Pour cette raison, l'étude expérimentale est complétée par une étude numérique qui permet de contrôler plus facilement les conditions aux limites au cours du cisaillement. L'approche discrète choisie pour cette étude est la méthode des éléments discrets de type smooth DEM [CUN 79]. Dans cette approche, le mouvement de chaque particule et les interactions avec les grains voisins sont traitées individuellement. Les simulations ont été menées avec le code « interne » DemGCE. Les lois d'interactions de type Hertz-Mindlin utilisées pour cette étude sont décrites dans [CHE 14, PIZ 14]. Une confrontation entre les résultats expérimentaux et numériques est d'abord présentée. Cette confrontation permet de montrer que le code numérique est capable de reproduire les comportements macroscopiques observés expérimentalement. Puis, une étude sur le comportement à l'interface d'un milieu granulaire cisailé en conditions périodiques est donnée.

##### 4.1 Confrontation expérimentale et numérique

La modélisation de l'essai tente de reproduire le plus fidèlement possible les conditions du protocole expérimental. Les grains du milieu granulaire doivent d'abord sédimenter sur la paroi rugueuse. La modélisation des créneaux est délicate. En effet, les créneaux ont des arêtes vives et des surfaces planes. Avec des éléments discrets, il est difficile de modéliser des arêtes vives. Pour cette raison, nous avons modélisé les créneaux par des paquets de sphères collés sur une surface plane [Figure 4-a]. Les parois latérales sont modélisées via les conditions aux limites de type plan (sphère de rayon infini). La préparation de l'empilement consiste dans un premier temps à générer par l'algorithme de génération RSA [WID 66] des grains dans le volume de calcul (compacité 0,3). Le nombre de grains et leur diamètre sont égaux à ceux de l'expérimentation. Les principaux

paramètres matériaux sont : module d'Young ( $E = 1,0E+8 \text{ Pa}$ ), coefficient de Poisson ( $\nu = 0,29$ ), coefficient de frottement de glissement ( $\mu_s = 0,15$ ), coefficient de roulement ( $\mu_r = 0,002$ ) et constante d'amortissement ( $A = 4,5E-5 \text{ s}^{-1}$ ). Ensuite, l'ensemble de grains est lâché sans vitesse initiale et sédimente sous l'effet de la gravité pour constituer un empilement stable (compacité de 0,62). Après la sédimentation des grains, une pression normale est appliquée sur l'empilement. Contrairement à l'expérimentation, par la modélisation numérique, la pression normale est uniformément distribuée sur la surface de l'empilement granulaire. En effet, au cours de l'essai expérimental, le couvercle ajouté sur l'empilement s'incline sous l'effet de la sortie des billes au niveau de la baguette, tandis que numériquement, la pression est contrôlée par un plan horizontal placé sur la surface supérieure de l'empilement. Afin de cisailer l'empilement, un déplacement horizontal et à vitesse constante est imposé au plan inférieur et aux grains collés sur ce plan.

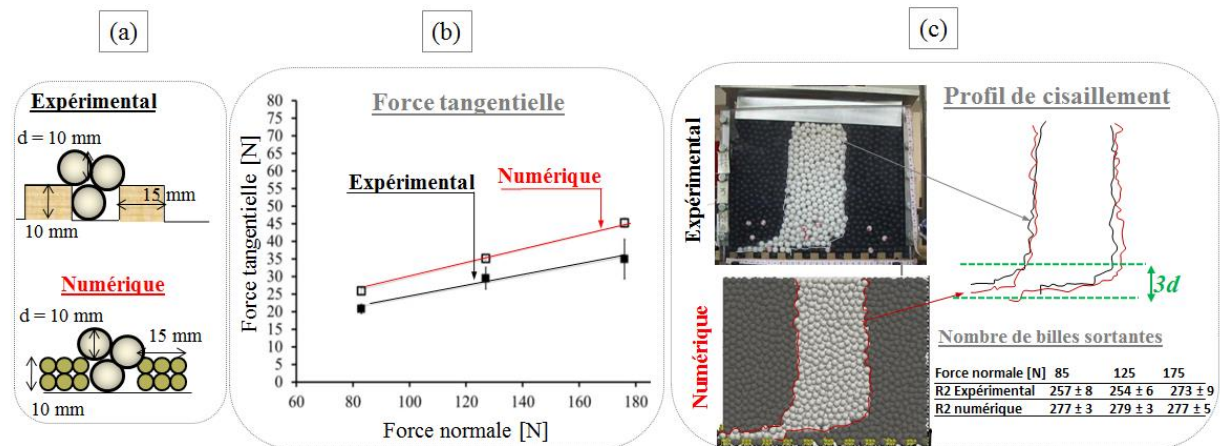


Figure 4. Comparaison expérimentale – numérique pour la baguette R2.

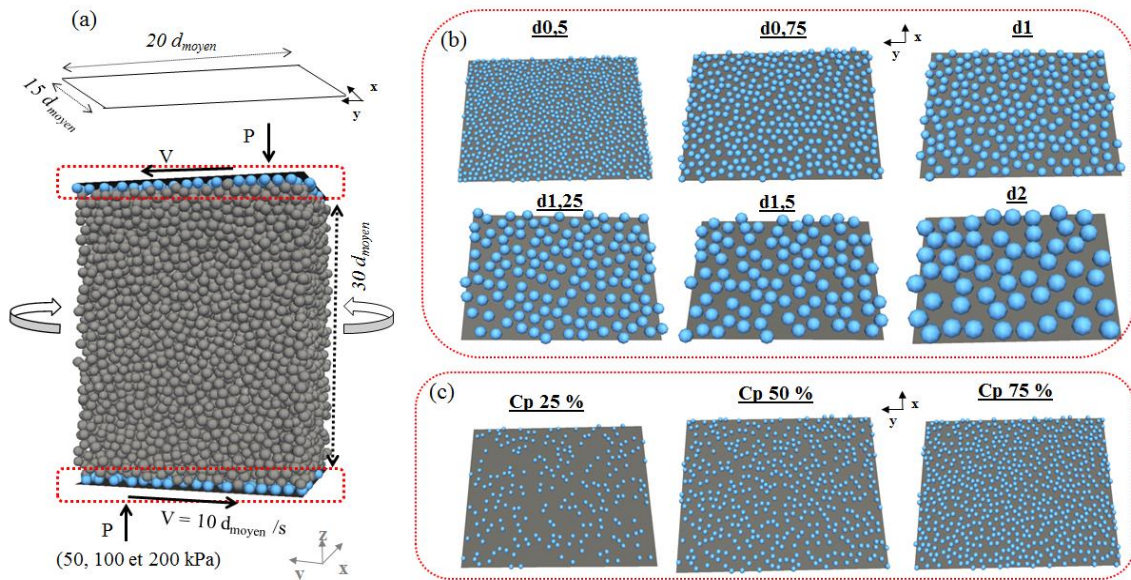
La comparaison entre l'expérience et la simulation numérique est réalisée sur la force tangentielle, sur le profil de cisaillement et sur le nombre de billes sortantes pour les trois baguettes. Nous ne présentons ici que la comparaison pour la seule baguette R2 puisque les interprétations sont similaires pour R1 et R3. La Figure 4-b montre que la force tangentielle augmente avec l'augmentation de la force normale. Les deux courbes expérimentale et numérique décrivent une droite ne passant pas par l'origine. L'écart entre l'expérience et la simulation est d'environ 5N. Cet écart est expliqué par la modélisation approximative des créneaux par des grains (Figure 4-a). Cependant, la distribution uniforme de la pression au cours de la simulation numérique pourrait expliquer l'augmentation de la force tangentielle par rapport à l'expérience. En ce qui concerne le profil de cisaillement [Figure 4-c], l'épaisseur de la zone cisailée est de l'ordre de trois diamètres de grains pour l'expérience et la simulation. L'étude comparative montre alors une concordance satisfaisante entre les résultats expérimentaux et numériques. Le code utilisé reproduit le comportement macroscopique.

## 5. Comportement à l'interface milieu granulaire - paroi rugueuse

La couche limite est une couche formée à l'interface dont le comportement diffère du reste du milieu loin de la paroi [DJE 04]. En se basant sur cette description de la couche limite, nous étudions par la méthode DEM l'influence des conditions à l'interface (pression normale et rugosité) sur l'état du cisaillement du milieu granulaire près et loin de la paroi rugueuse.

Dans la littérature, plusieurs études numériques ont été réalisées sur le cisaillement plan – plan d'un milieu granulaire [GDR 04]. La Figure 5-a présente un schéma du système simulé. Le système étudié est considéré comme une partie d'un système infini par l'utilisation de conditions aux limites périodiques. Tout d'abord, 10000 grains légèrement polydisperses (10%) de diamètre moyen  $d_{moyen}$  égal à 10 mm sont générés aléatoirement dans la cellule de simulation, entre deux parois rugueuses, par l'algorithme de génération RSA. Le milieu est ensuite confiné en déplaçant verticalement, à vitesse contrôlée, les deux parois en sens opposé. Après la préparation de l'empilement confiné, le système est sollicité de manière symétrique par un déplacement horizontal à vitesse imposée  $V$  en sens opposé appliqué aux deux parois rugueuses. Lors du cisaillement et une fois que l'état d'écoulement stationnaire est atteint, la contrainte tangentielle exercée sur la paroi mobile et le profil moyen de vitesse sont mesurés. Il s'agit d'un profil présentant la variation des vitesses moyennes des grains dans la direction du cisaillement en fonction de la hauteur du système. Ce profil permet de décrire l'état du cisaillement.





**Figure 5.** (a) Schéma du système simulé ; (b) Différentes rugosités étudiées pour une concentration de grains de  $C_p$  100% et (c) Différentes concentrations pour une rugosité  $d_{0,5}$

La rugosité de la paroi est modélisée en collant des grains monodisperses de diamètre  $dp$  sur les plans inférieur et supérieur. Les grains sont placés aléatoirement sur chaque plan au moyen d'un algorithme RSA bidimensionnel [WID 66]. La dispersion des grains sans arrangement particulier permet d'étudier une rugosité plus proche de la réalité dont les aspérités sont irrégulières. Nous avons fait varier d'abord le diamètre des grains collés sur la paroi. La rugosité de la paroi est désignée par  $dn$  où  $n$  est le rapport  $dp/d_{moyen}$ . Six rugosités sont étudiées :  $d_{0,5}$  ;  $d_{0,75}$  ;  $d_1$  ;  $d_{1,25}$  ;  $d_{1,5}$  et  $d_2$  [Figure 5-b]. Pour chaque rugosité, nous avons fait varier également la concentration des grains désignée par  $C_p$  %. Une concentration  $C_p$  100% correspond au nombre maximal de grains générés par RSA en 2D (compacité 2D de 0,547). Quatre concentrations : 25% ; 50% ; 75% et 100% sont étudiées [Figure 5-c]. Les conditions à l'interface (pression normale et vitesse) sont choisies de manière à obtenir un nombre inertiel  $I$  faible (inférieur à  $1,0 \text{ E-}2$ ). Normalement, dans ces conditions, le profil de cisaillement devrait être linéaire (cisaillement uniforme [GDR 04]).

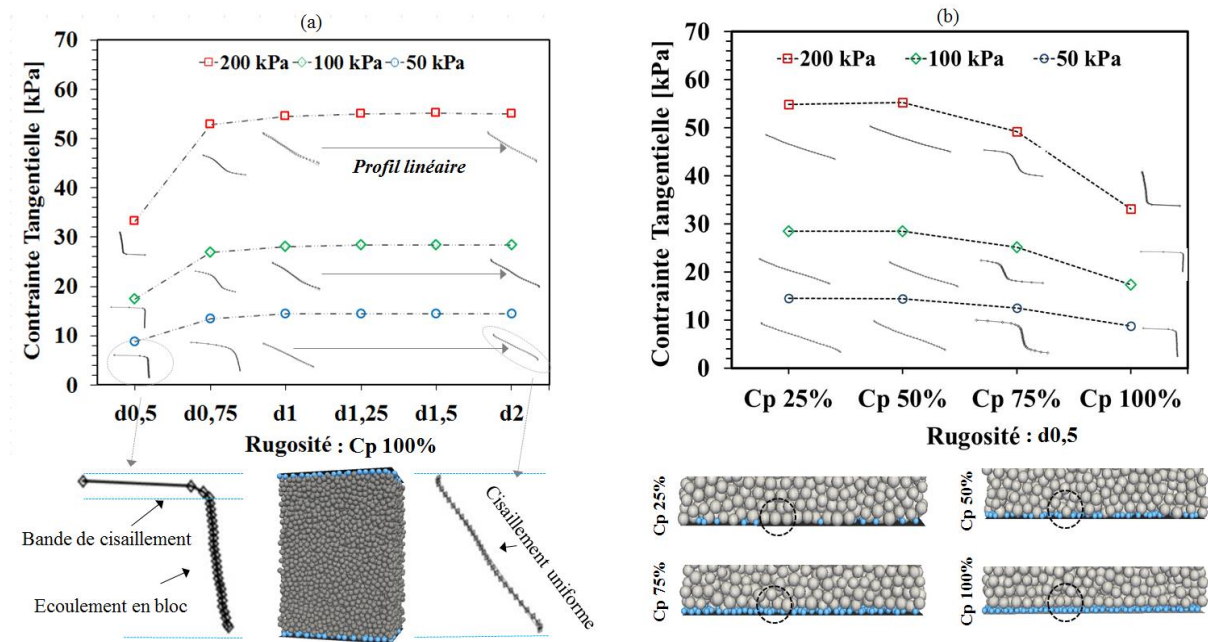
La Figure 6-a présente la variation de la contrainte tangentielle exercée sur la paroi rugueuse en fonction de la rugosité pour différentes pressions normales. Afin d'étudier l'influence de la pression normale et de la rugosité de la paroi sur l'état de cisaillement du milieu, nous avons ajouté au niveau de chaque point de mesure l'allure du profil de vitesse. Pour les différentes pressions étudiées, les résultats obtenus montrent que pour une rugosité inférieure à  $d_1$ , la contrainte tangentielle augmente avec la rugosité. A partir d'une rugosité de  $d_1$ , la contrainte tangentielle devient constante. L'allure du profil moyen de vitesse explique la variation de la contrainte tangentielle en fonction de la rugosité. En effet, pour une rugosité  $d_{0,5}$ , le profil de vitesse est en forme de « L » [Figure 6-a]. Un glissement se traduisant par une bande de cisaillement apparaît près d'une des deux interfaces. Plus loin de cette bande, le milieu se déplace par un mouvement collectif en « bloc ». Lorsqu'on augmente la rugosité ( $d_{0,75}$ ), le profil de vitesse prend une forme de « S » puis le glissement à l'interface disparaît et le profil de vitesse devient linéaire pour une rugosité plus élevée (à partir de  $d_1$ ).

La vitesse de glissement relative ( $V_g$ ) entre le milieu granulaire et la paroi rugueuse est également calculée [1].  $V_{max}$  et  $V_{min}$  sont respectivement les vitesses maximale et minimale sur le profil de vitesse.  $V$  est la vitesse de déplacement de la paroi.

$$V_g = 2 |V| - [V_{max} - V_{min}] \quad [1]$$

Le Tableau 1 montre la variation de la vitesse de glissement pour les différentes conditions à l'interface. Nous constatons que lorsque la rugosité de la paroi augmente, le glissement du milieu sur la paroi rugueuse devient plus faible et naturellement la force de frottement du milieu contre la paroi rugueuse devient plus importante. Pour des rugosités inférieures à  $d_1$ , le glissement se traduit par la formation d'une bande de cisaillement localisée près de la paroi. Une fois que le milieu est entièrement cisailé, la rugosité n'a plus d'influence sur la contrainte tangentielle car la vitesse de glissement relative devient faible (environ 0,01). De plus, nous remarquons que

l'épaisseur de la couche cisailée est plus élevée pour une rugosité  $d0,75$  (d'environ  $8 \times d_{moyen}$ ) que pour une rugosité  $d0,5$  (d'environ  $4 \times d_{moyen}$ ). Lorsqu'on augmente la rugosité, on cisaille plus le milieu et la force tangentielle augmente. Une fois que le milieu est entièrement cisailé, aucune force supplémentaire n'est nécessaire pour le cisaillement et la contrainte tangentielle reste donc constante.



**Figure 6.** Influence de la rugosité de la paroi sur la contrainte tangentielle et sur le profil moyen de vitesse.

**Tableau 1.** Vitesse de glissement relative (cm/s) dans les différentes conditions à l'interface.

$V_g$	$I$ (nombre inertiel)	$d0,5$	$d0,75$	$d1$	$d1,25$	$d1,5$	$d2$
P 50 kPa	1,50 E-3	11,45	1,55	0,05	0,02	0,01	-0,02
P 100 kPa	1,05 E-3	5,40	2,11	0,06	0,00	0,04	0,02
P 200 kPa	7,5 E-4	12,09	1,22	0,09	0,04	-0,01	-0,01

Dans le cas du pompage du béton, en partie centrale du tuyau, le béton se déplace en bloc. Près de l'interface, il est cisailé dans une zone peu épaisse correspondant à la couche limite. Le profil de vitesse est donc formé de deux zones : une zone cisailée et une zone d'écoulement en bloc. L'analogie entre l'écoulement du béton dans un tuyau et le cisaillement d'un milieu granulaire sur une paroi rugueuse suggère que la couche cisailée « couche limite » se forme à l'interface pour une rugosité formée de grains de diamètre inférieur au diamètre moyen des grains constituant le milieu, c'est-à-dire, pour une profondeur des aspérités inférieure à la taille moyenne des grains de ciment. De plus, l'épaisseur de cette couche devient plus élevée lorsque la rugosité de la paroi augmente. Il est important toutefois de noter que les résultats sont obtenus sur un milieu granulaire sec, la présence du fluide interstitiel (eau dans la couche limite) aurait une influence sur les grandeurs mesurées.

La Figure 6-b présente la variation de la contrainte tangentielle en fonction de la concentration des grains de la paroi pour une rugosité  $d0,5$ . Lorsque la concentration des grains collés sur la paroi diminue, la contrainte tangentielle augmente, de plus, le profil de vitesse passe d'un profil en forme de L à un profil en forme de S puis à un profil linéaire. Dans le cas d'une rugosité  $d0,5$ , la diminution de la concentration des grains de la rugosité se traduit probablement par une augmentation de la profondeur de pénétration des grains du milieu granulaire dans la rugosité. En effet, en réduisant la concentration, les grains de la rugosité s'espacent les uns des autres ce qui permet aux grains du milieu de s'insérer dans des creux plus profonds. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons calculé les distances de pénétration maximale des grains du milieu dans les creux formés par les grains de la paroi. La Figure 6-b montre la disposition des grains sur une surface de rugosité  $d0,5$  pour les quatre concentrations étudiées. Nous avons constaté une augmentation importante de la profondeur de pénétration des grains du milieu dans la rugosité lorsque la concentration passe de 100 (pénétration  $0,282 d_{moyen}$ ) à 75% (pénétration  $0,509 d_{moyen}$ ). Une légère augmentation est également observée pour une réduction supplémentaire

de la concentration à 50% (pénétration  $0,544 d_{moyen}$ ). En dessous de cette concentration, la pénétration des grains du milieu dans la rugosité reste constante car les grains sont au contact de la paroi. Ainsi, pour une concentration  $C_p = 100\%$ , la profondeur des creux de la rugosité ( $0,282 d_{moyen}$ ) semble dans ce cas insuffisante pour que le milieu soit complètement cisailé. Lorsque la profondeur de pénétration devient plus élevée (entre  $0,509 d_{moyen}$  et  $0,544 d_{moyen}$ ), pour se déplacer, les grains du milieu doivent dépasser une profondeur égale au diamètre des grains de la rugosité ( $0,5 d_{moyen}$ ). Cette profondeur semble suffisante pour que le milieu devienne entièrement cisailé. Par analogie avec l'écoulement du béton, il semblerait que le paramètre prépondérant dans la formation de la couche limite soit la profondeur de pénétration des grains dans les aspérités. Pour une rugosité supérieure ou égale à  $d0,75$ , la concentration des grains collés sur la paroi n'a pas une influence sur la contrainte tangentielle.

## 6. Conclusions et perspectives

Les résultats obtenus sur le dispositif expérimental permettent de mettre en évidence que la profondeur des creux à franchir à la paroi par les grains du milieu contribue fortement à l'augmentation de la contrainte de frottement. Les limites expérimentales nous ont menés à réaliser des simulations numériques en conditions périodiques. Dans un premier temps, nous avons validé notre modèle par une comparaison expérimentale et numérique dans des différentes conditions de sollicitations. Les résultats des simulations réalisées sur un empilement monodisperse en conditions périodiques ont montré qu'il existe une rugosité critique (dans notre cas  $d1$ ), à partir de laquelle la contrainte tangentielle reste constante et le milieu devient entièrement cisailé, tandis que pour une rugosité inférieure à la rugosité critique, la contrainte tangentielle augmente avec la rugosité et le profil de vitesse présente une bande de cisaillement d'épaisseur plus importante. La variation de la concentration des grains collés sur la paroi, montre que la contrainte tangentielle diminue avec l'augmentation du nombre des grains collés. En d'autres termes, lorsqu'on diminue le nombre des grains collés sur la paroi, la profondeur des aspérités devient plus importante. L'augmentation de la profondeur des aspérités contribue fortement au cisaillement du milieu et à l'augmentation de la contrainte tangentielle. Ces résultats obtenus en conditions périodiques permettent de suggérer que la couche limite se forme pour une profondeur des aspérités inférieure à la taille moyenne des grains de ciment.

En perspectives, d'autres études devront être entreprises pour étudier l'effet de la rugosité de la paroi sur la structuration et la composition du milieu granulaire à l'interface. Ce travail se poursuit sur des empilements polydispersés de faible étendue granulaire afin d'étudier la migration des particules près de l'interface. Ceci permettra d'apporter plus de réponses sur l'épaisseur de la couche limite et sur les mécanismes de sa formation.

## 7. Bibliographie

- [CHE 14] EL CHEIKH K., PIZETTE P., DJELAL C., REMOND S., VANHOVE Y., « Etude du comportement à l'interface d'un milieu granulaire sur une paroi rugueuse », *Actes de 32èmes Rencontres de l'AUGC*, Polytech Orléans, 4-6 juin 2014.
- [CUN 79] CUNDALL P. A., STRACK O. D. L., « A discrete numerical model for granular assemblies », *Géotechnique*, vol. 29, 1979, p. 47-65.
- [DJE 04] DJELAL C., VANHOVE Y., MAGNIN A., « Tribological behaviour of self compacting concrete », *Cement and Concrete research*, vol. 34, 2004, p. 821-828.
- [GDR 04] GDR-MIDI, « On dense granular flows », *Euro. Phys. J. E*, vol. 14, 2004, p. 341-365.
- [KAP 00] KAPLAN D., *Pompage des bétons*, Thèse de doctorat, École Nationale des ponts et Chaussées, 2000.
- [LIB 06] LIBESSART L., *Influence de la composition des agents de démoulage à l'interface coffrage/béton - Impact sur l'esthétique des parements en béton*, Thèse de doctorat, Université d'Artois, 2006.
- [PIZ 14] PIZETTE P., RÉMOND S., « Experimental and numerical studies of the effect of rolling friction for sandpile formation », *WCCM XI conference*, Barcelona, Spain, 20-25 July 2014.
- [RAS] RASBAND W., *imageJ*, National Institutes of Health, Bethesda MD, USA, [imagej.nih.gov/ij/](http://imagej.nih.gov/ij/).
- [WID 66] WIDOM B., « Random Sequential Addition of Hard Spheres to a Volume », *The Journal of Chemical Physics*, vol. 44, 1966, p. 3888-3894.