Mécanique des matériaux granulaires

Séance 5 : Modélisation discrète avancée

Guilhem MOLLON

4GMD 2014-2015

Plan de la séance

-Lois de contact enrichies

-Raideur normale non linéaire
-Généralités sur les lois cohésives
-Cohésion capillaire
-Modèles physiques d'adhésion

-Grains de morphologies complexes

-Génération d'échantillons complexes
-Modélisation par clusters de disques ou de sphères
-Modélisation par polygones ou polyèdres

Mécanique des matériaux granulaires

Lois de contact enrichies

Raideur normale non linéaire

-Principe

Dans l'immense majorité des cas, la raideur normale de contact est considérée comme un paramètre numérique, qui sert à :

-Régulariser les inéquations du problème pour que le schéma numérique puisse les résoudre
-Pénaliser l'interpénétration entre les grains

Elle est donc choisie comme un compromis entre la précision et le coût calculatoire.

La réalité physique est plus complexe : lorsqu'ils rentrent en contact les grains subissent des déformations, localisées autour du contact. La loi contrôlant les efforts répulsifs qui résultent de ces déformations dépend de :

-Les propriétés élastiques du matériau composant les grains
-La courbure locale des grains au voisinage du contact

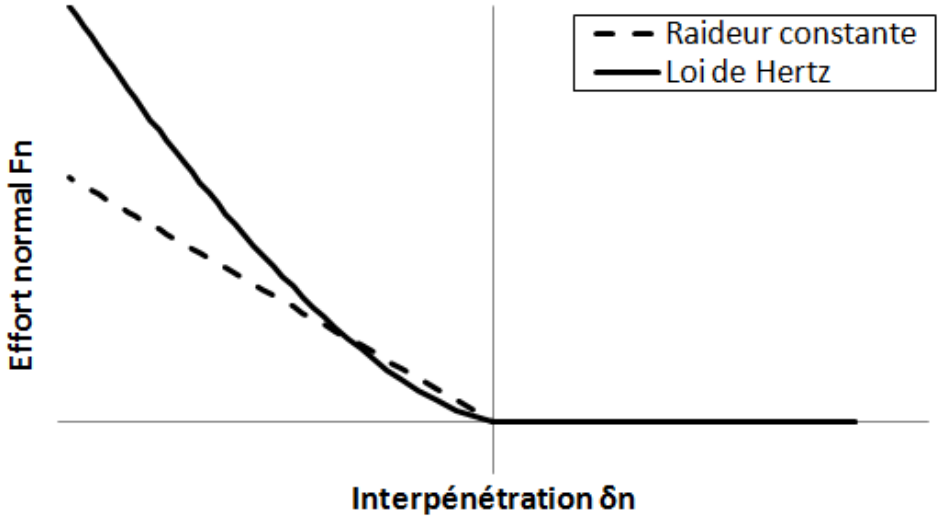
Raideur normale non linéaire

-Principe

La situation la plus simple correspond à des solides non-frottants en conditions quasi-statiques : c'est la théorie de Hertz.

Ce modèle a été étendu (sommairement) pour tenir compte des effets tangentiels liés au frottement. La variante la plus utilisée est le modèle de Hertz-Mindlin.

Il substitue à la raideur normale une loi puissance, dont l'exposant dépend de la dimension (exposant 3/2 en 3D). La loi devient donc non-linéaire, mais conserve son caractère élastique.



Raideur normale non linéaire

-Principe

-Contexte d'utilisation

Le recours à une loi non-linéaire peut être intéressant dans certaines situations :

-si on s'intéresse aux champs de contraintes dans les particules

-si on a besoin de connaître les surfaces de contact réelles

-si le comportement macroscopique en est affecté

Cette dernière situation est très rare. Dès que l'on entre en déformations, l'expérience montre que le choix d'une loi non-linéaire ne modifie pas le comportement général. C'est encore plus vrai en grandes déformations, et en écoulements denses et collisionnels.

La seule situation pour laquelle un effet est notable est celle des très petites déformations, par exemple le cas de la propagation d'ondes élastiques dans un milieu granulaire dense.

Raideur normale non linéaire

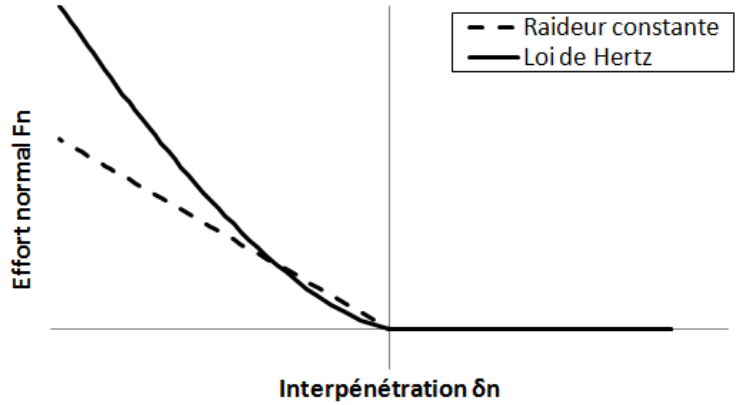
-Principe
-Contexte d'utilisation
-Difficultés à prendre en compte

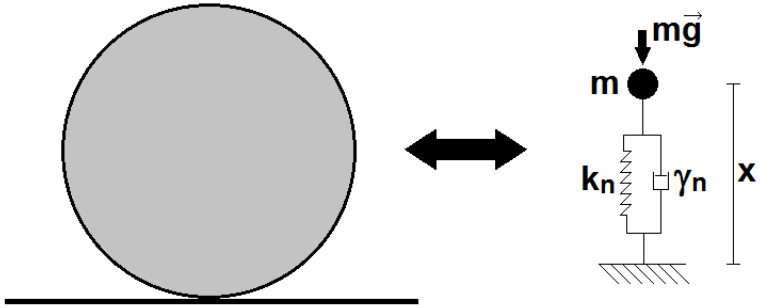
L'implémentation de lois non-linéaires ne présente aucune difficulté technique.

En revanche, il faut être vigilant au choix des paramètres numériques utilisés pendant la simulation :

-Pour être réalistes, les raideurs de contact sont généralement très élevées, ce qui implique des pas de temps très faibles et des temps de calcul importants.

-Puisque la raideur varie avec l'interpénétration, on ne peut pas déterminer avec précision la fréquence caractéristique des oscillateurs du système. Le pas de temps idéal est donc indéterminé au début de la simulation.





Généralités sur les lois cohésives

-Contextes d'application

On appelle lois cohésives les lois d'interaction autorisant l'existence d'un effort attractif entre les grains, soit en cas de contact soit à partir d'une certaine distance.

Physiquement, cette situation correspond plutôt aux poudres et milieux granulaires fins, pour lesquels certains phénomènes physico-chimiques deviennent notables (interactions électrostatiques, etc.)

On utilise aussi les lois cohésives pour modéliser :

-la cohésion liée à la présence d'eau interstitielle
-la cohésion liée à la cimentation des grains

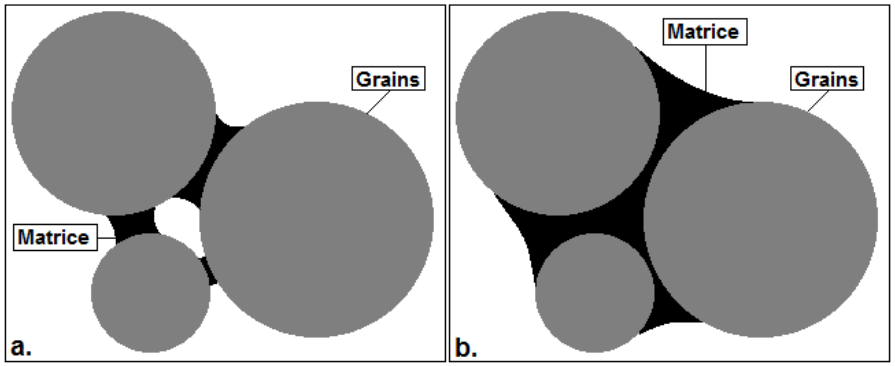
Généralités sur les lois cohésives

-Contextes d'application

Dans le cas d'une cohésion créée par un troisième milieu, qu'il s'agisse d'un fluide (cohésion capillaire) ou d'un solide (cimentation par une matrice), la DEM ne peut s'appliquer directement que si la fraction de ce troisième milieu est limitée.

En particulier, les interactions de la DEM doivent rester purement binaires, c'est-à-dire n'impliquer que deux grains à chaque fois.

Les lois cohésives ne s'appliquent donc que pour représenter des « ponts » entre particules, et non pas une phase interstitielle continue.



Généralités sur les lois cohésives

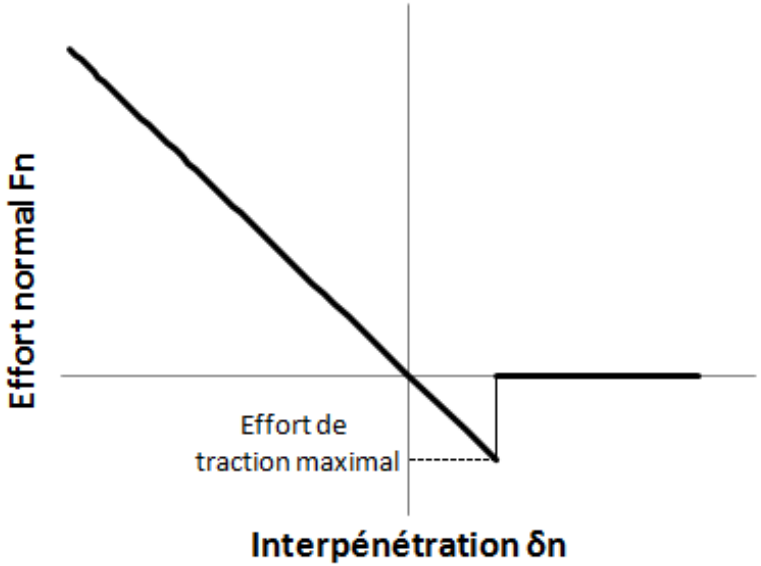
-Contextes d'application

-Lois d'attractions

Pour définir numériquement une loi cohésive, le premier ingrédient à contrôler est l'expression de la force normale F_n (répulsive ou attractive) se développant entre les deux grains en fonction de la distance δ_n (positive ou négative) entre leurs surfaces.

Contrairement au modèle standard, on a souvent des efforts non-nuls qui se développent même en l'absence de contact (i.e. pour $\delta_n > 0$).

De nombreuses expressions sont possibles, comme par exemple une relation de proportionnalité entre F_n et δ_n , même en l'absence de contact.



Généralités sur les lois cohésives

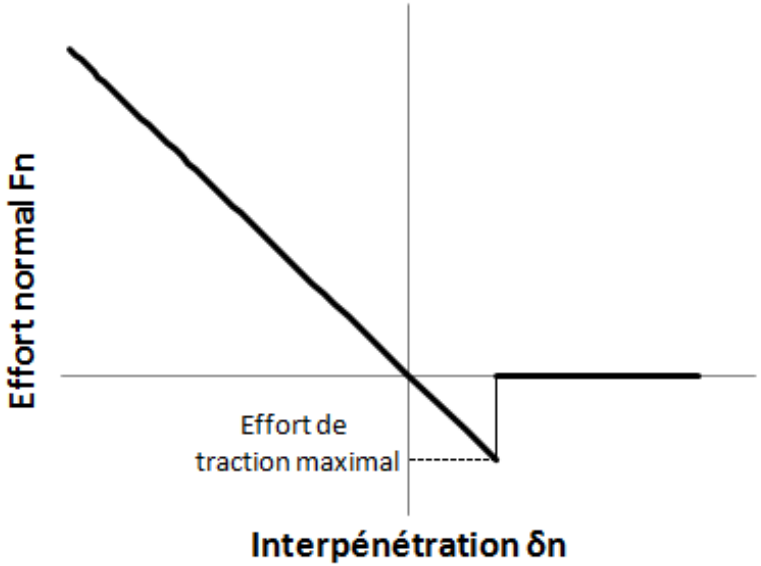
-Contextes d'application
-Lois d'attractions
-Critères de rupture

Le deuxième ingrédient essentiel est la définition d'un domaine de validité de la loi d'interaction. Il s'agit d'un critère qui renseigne l'algorithme sur le fait qu'une loi doit être prise en compte ou non entre deux grains donnés, par exemple en fonction de la distance qui les sépare.

On pourra par exemple énoncer cette condition à la manière d'un critère de plasticité :

$$f(F_n, F_t) \geq 0$$

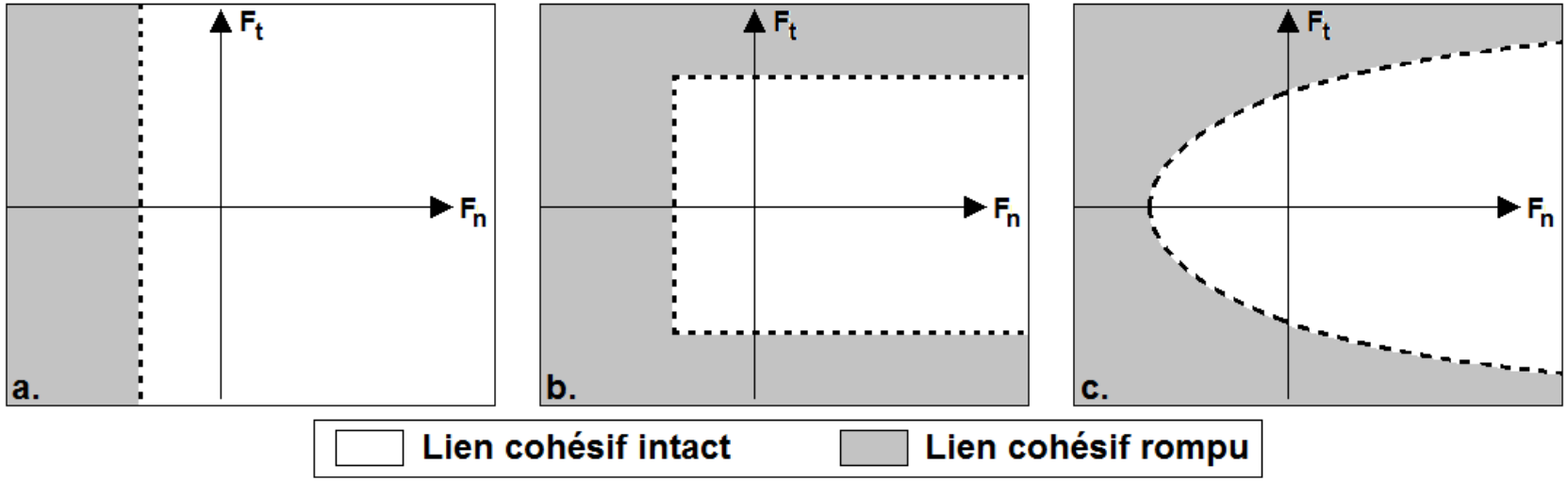
La fonction f définissant le critère est ici dépendante des efforts normal et tangentiel dans la liaison. La liaison cohésive existe tant que cette fonction est positive, et disparaît si elle devient nulle ou négative.



Généralités sur les lois cohésives

-Contextes d'application
-Lois d'attractions
-Critères de rupture

On peut par exemple imaginer une rupture de liaison par dépassement d'un effort normal de traction maximale, ou d'un effort tangentiel maximal, ou d'une combinaison des deux.

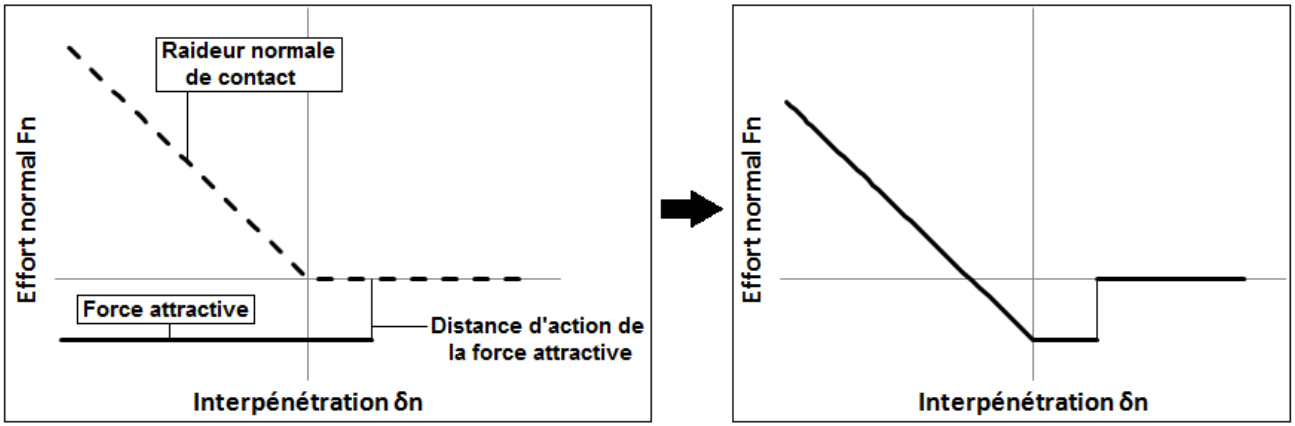


Généralités sur les lois cohésives

-Contextes d'application
-Lois d'attractions
-Critères de rupture
-Un exemple simple

La loi cohésive la plus simple consiste à superposer au modèle standard (raideur normale de contact constante) un effort attractif, actif jusqu'à une certaine distance de séparation pour laquelle il disparaît.

Dans cette loi, on note que le point d'équilibre (pour lequel l'effort de contact est nul) correspond à une interpénétration non nulle.



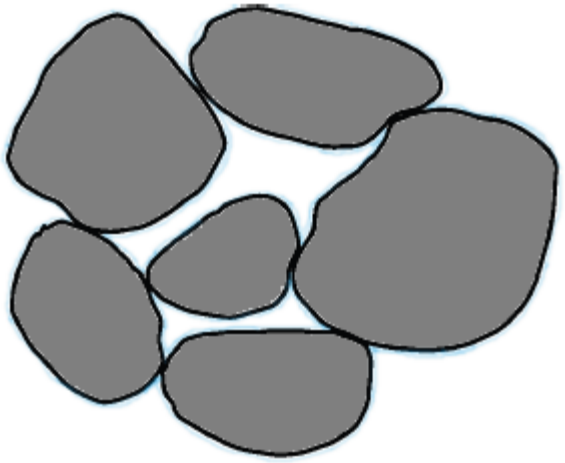
Cohésion capillaire

-Milieux triphasiques

Un cas particulier de cohésion est celui des milieux granulaires non-saturés, c'est-à-dire des systèmes triphasiques avec une phase solide (le squelette granulaire), une phase liquide (composant les ponts capillaires) et une phase gazeuse (composant le reste de l'espace poral).

Selon la teneur en fluide, plusieurs régimes sont possibles

En l'absence totale de fluide, on est dans le régime sec. En pratique, il est assez rare, et l'eau est presque toujours présente en surface, sous la forme liée ou adsorbée. On est alors dans le régime hygrométrique.

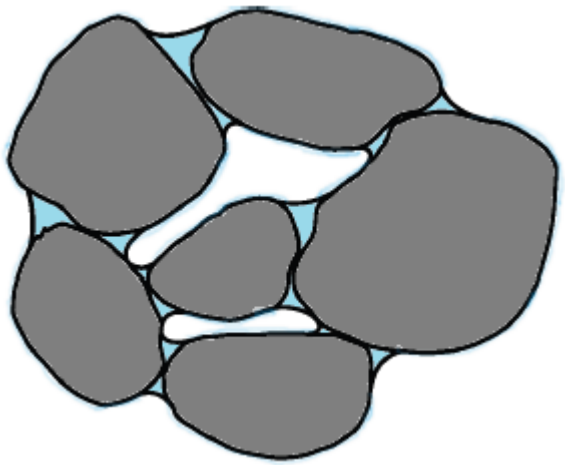


Ces deux situations sont différentes sur le plan physico-chimique, mais comparables sur le plan mécanique. La cohésion capillaire est alors absente du système.

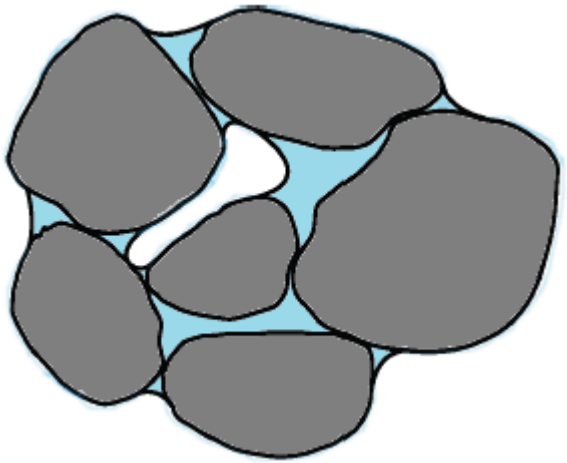
Cohésion capillaire

-Milieux triphasiques

Lorsque l'eau est présente en quantité suffisante, elle forme des ponts capillaires au niveau des contacts et des zones de proximité entre les grains. C'est le régime « pendulaire ».



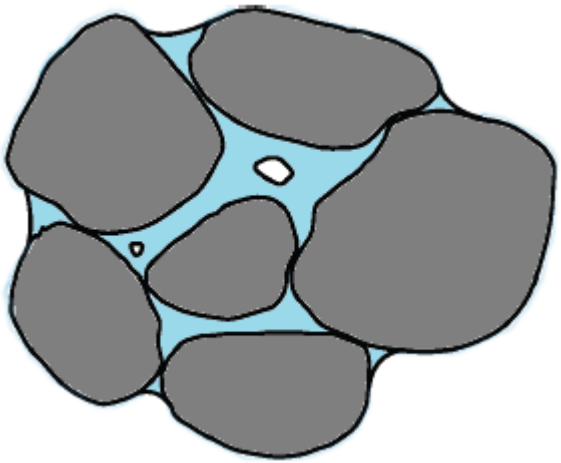
En augmentant la teneur en eau, on atteint ensuite un état pour lequel plusieurs ponts capillaires fusionnent, pour former une phase liquide un peu plus continue. L'air est piégé à l'état de bulles plus ou moins étendue. C'est le régime « funiculaire ».



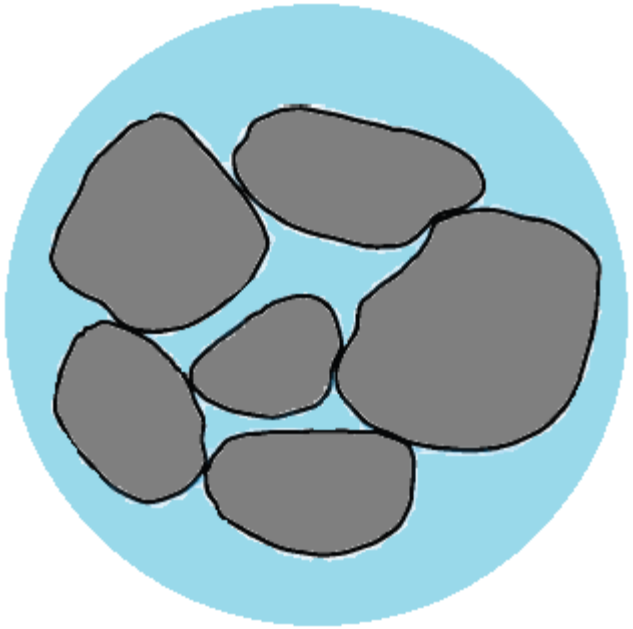
Cohésion capillaire

-Milieux triphasiques

Lorsque la phase liquide occupe la quasi-totalité de l'espace poral mais que le fluide est à l'état de dépression (relativement à la pression du gaz extérieur), on parle de régime « capillaire ».



Enfin, lorsque tous les grains sont plongés dans un fluide à pression ambiante, on parle de régime saturé. Ce régime se caractérise par un comportement proche de celui du matériau sec, pour peu que les sollicitations soient suffisamment lentes pour laisser au fluide le temps de se répartir équitablement dans le matériau.



Cohésion capillaire

-Milieux triphasiques

La cohésion capillaire est un phénomène essentiel dans le cas des géomatériaux.

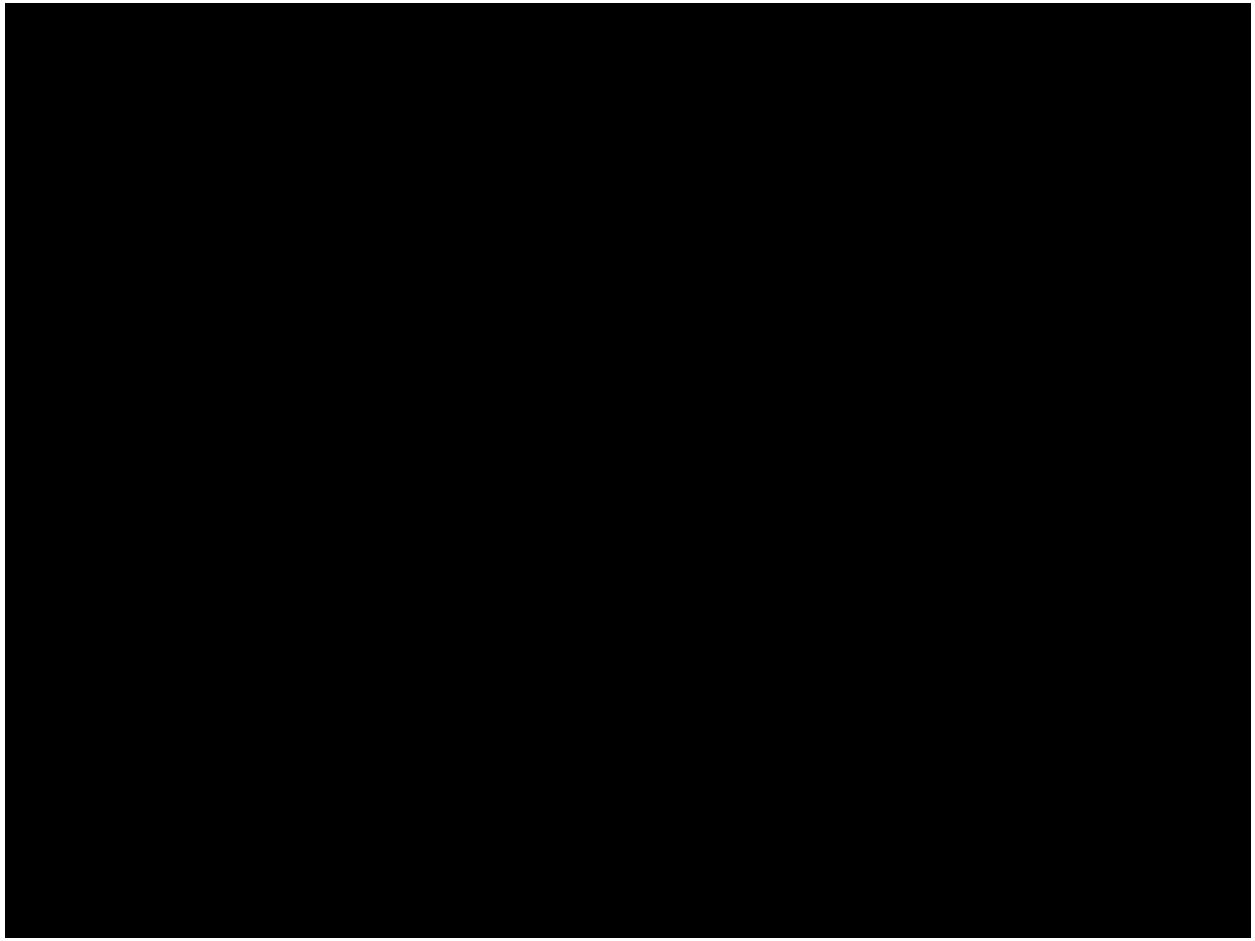
Elle est également à l'origine de comportements inattendus en laboratoire.

Cohésion capillaire

-Milieux triphasiques

La cohésion capillaire est un phénomène essentiel dans le cas des géomatériaux.

Elle est également à l'origine de comportements inattendus en laboratoire.



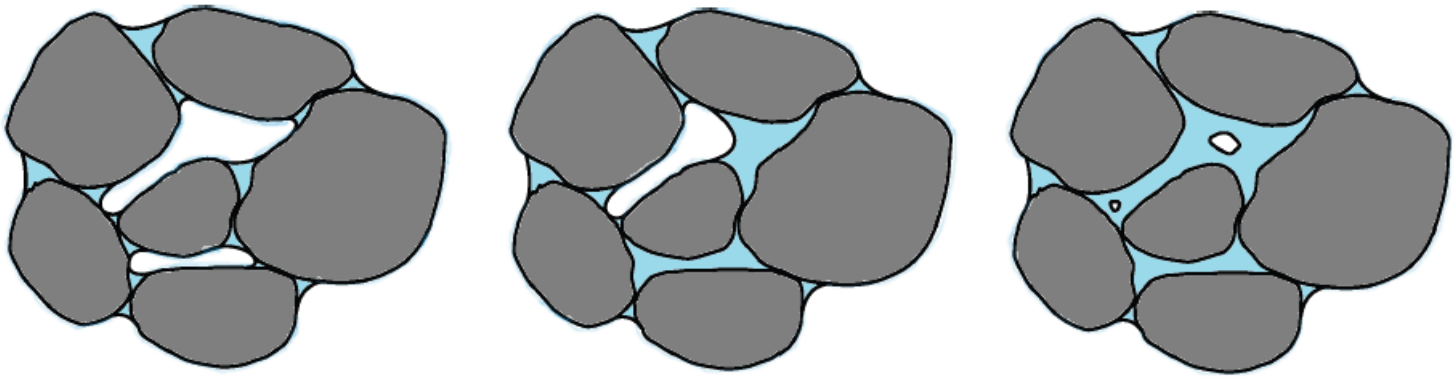
Cohésion capillaire

-Milieux triphasiques

Parmi tous ces régimes, les seuls pour lesquels une cohésion capillaire se développe sont les régimes pendulaire, funiculaire et capillaire.

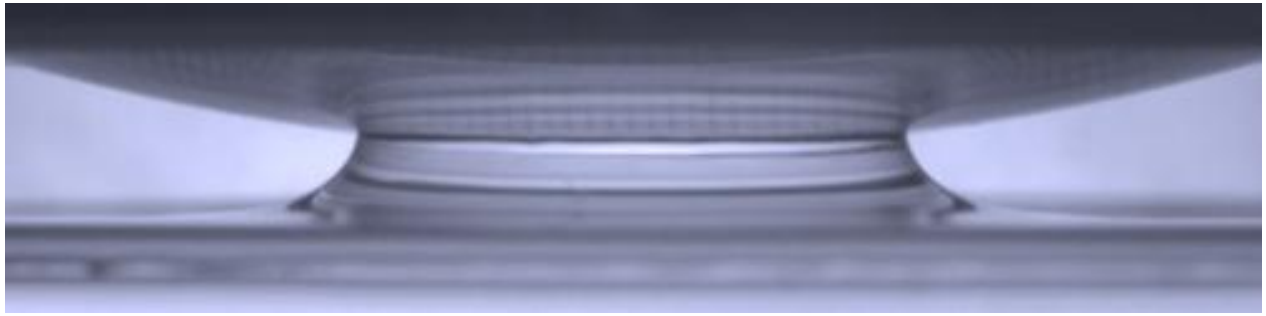
Et parmi ces trois régimes, le seul que l'on peut traiter de manière simple avec de la DEM est le régime pendulaire. Pour les deux autres, les lois d'interaction ne sont pas simplement binaires, et on doit passer par de complexes couplages CFD-DEM multiphasiques.

Le champ d'application de la DEM classique est donc assez restreint.



Cohésion capillaire

-Milieux triphasiques
-Ponts capillaires



L'origine physique des forces de capillarités est liée au phénomène de tension superficielle, qui existe à la frontière entre deux liquides non miscibles ou entre un liquide et un gaz.

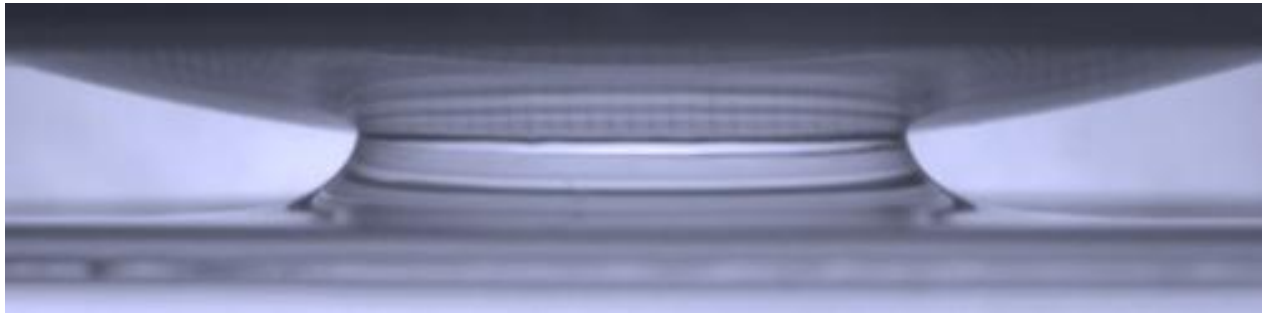
Les molécules ont tendance à être attirées vers leurs milieux respectifs, avec plus ou moins d'intensité, ce qui génère une force de tension à l'interface entre les milieux. L'interface se comporte comme une membrane tendue qui s'oppose aux déformations du liquide.

Cet effet est caractérisé par une grandeur macroscopique appelée tension superficielle, souvent notée γ_l.

Cohésion capillaire

-Milieux triphasiques

-Ponts capillaires



La courbure moyenne de l'interface C est reliée à la différence de pression Δu entre le fluide et le gaz par la loi de Laplace :

$$\Delta u = \gamma_l \cdot C$$

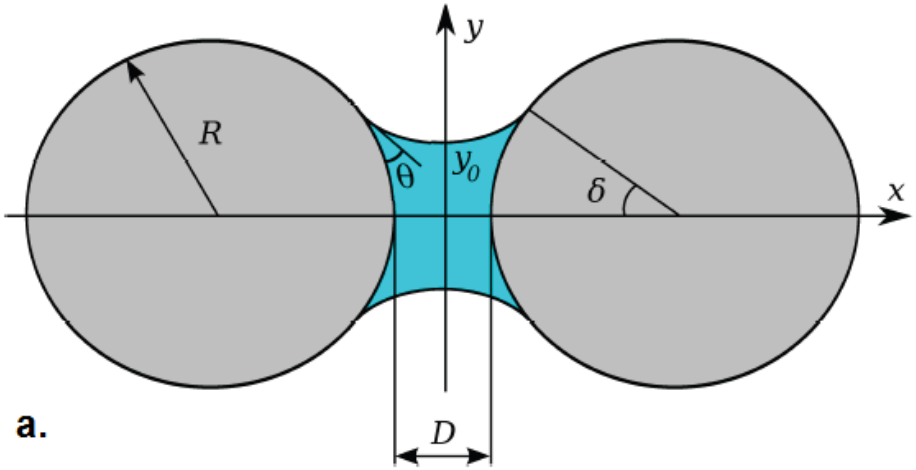
Si cette courbure est positive (goutte d'eau), la pression dans le liquide est supérieure à celle du gaz. Dans le cas contraire (pont capillaire classique), le liquide est en dépression par rapport au gaz environnant.

La courbure pilote donc totalement la forme du pont capillaire, qui peut être très complexe s'il relie plus de deux grains et/ou si leurs formes ne sont pas sphériques.

Cohésion capillaire

-Milieux triphasiques

-Ponts capillaires



Dans le cas très simplifié de deux grains sphériques de même diamètre, l'effort attractif est donné par la formule suivante :

$$F_{cap} = -2\pi \cdot \gamma_l \cdot y_0 - \pi \cdot \Delta u \cdot y_0^2$$

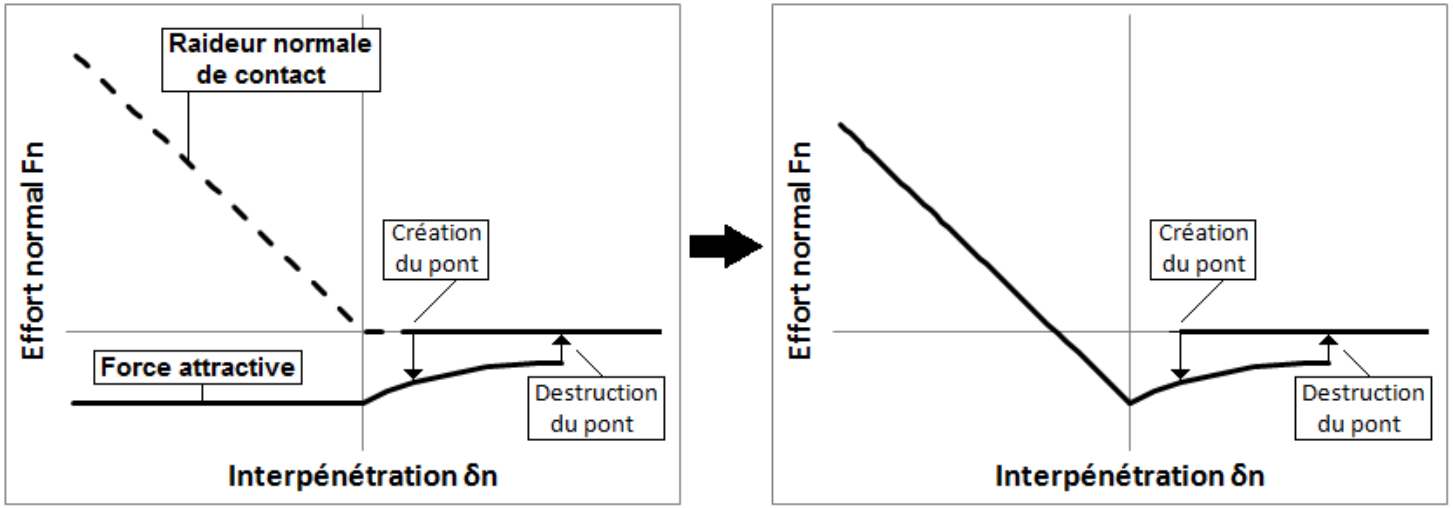
Dans cette expression, y_0 représente le « rayon de gorge », qui dépend d'un nombre très important de facteurs : diamètre des grains, distance de séparation, volume d'eau présent dans le liquide (lui-même résultant d'un équilibre thermodynamique avec le gaz ambiant !), angle de mouillage, pureté de l'eau, etc.

Cohésion capillaire

-Milieux triphasiques
-Ponts capillaires
-Implémentation

En réalité, le calcul exact de l'effort attractif d'origine capillaire est un problème non résolu.

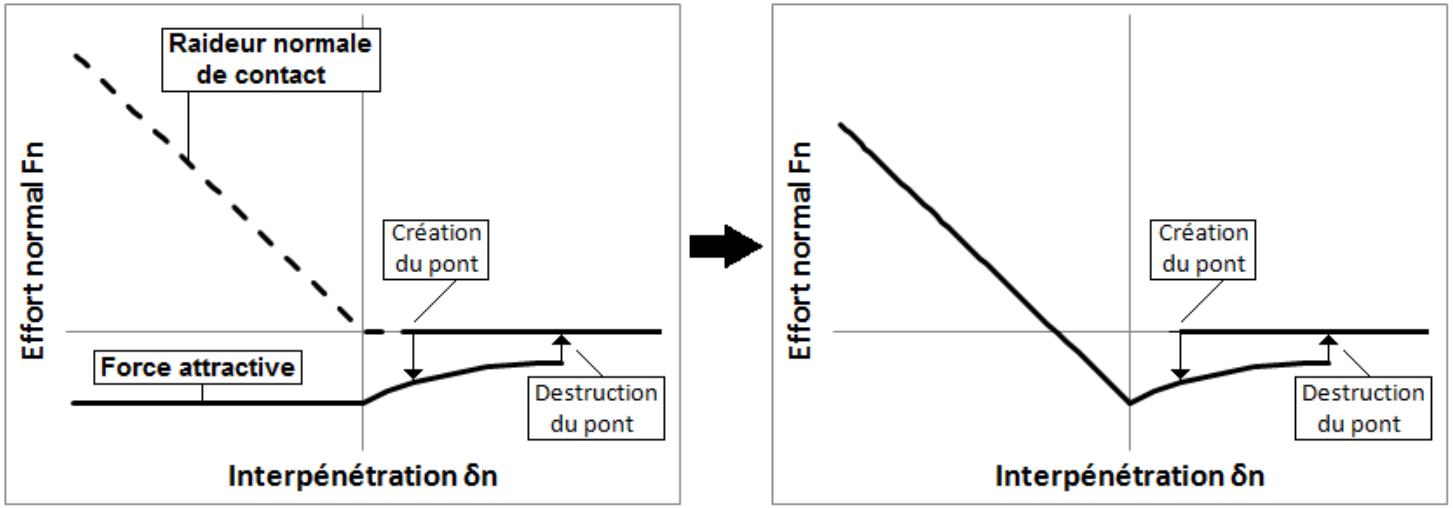
On a recours à des approches très simplifiées lorsqu'il s'agit d'introduire ce phénomène dans un modèle discret. Généralement, on reproduit le principe de la situation simplifiée présentée plus tôt : on superpose une loi DEM standard et un effort attractif choisi aussi réaliste que possible.



Cohésion capillaire

-Milieux triphasiques
-Ponts capillaires
-Implémentation

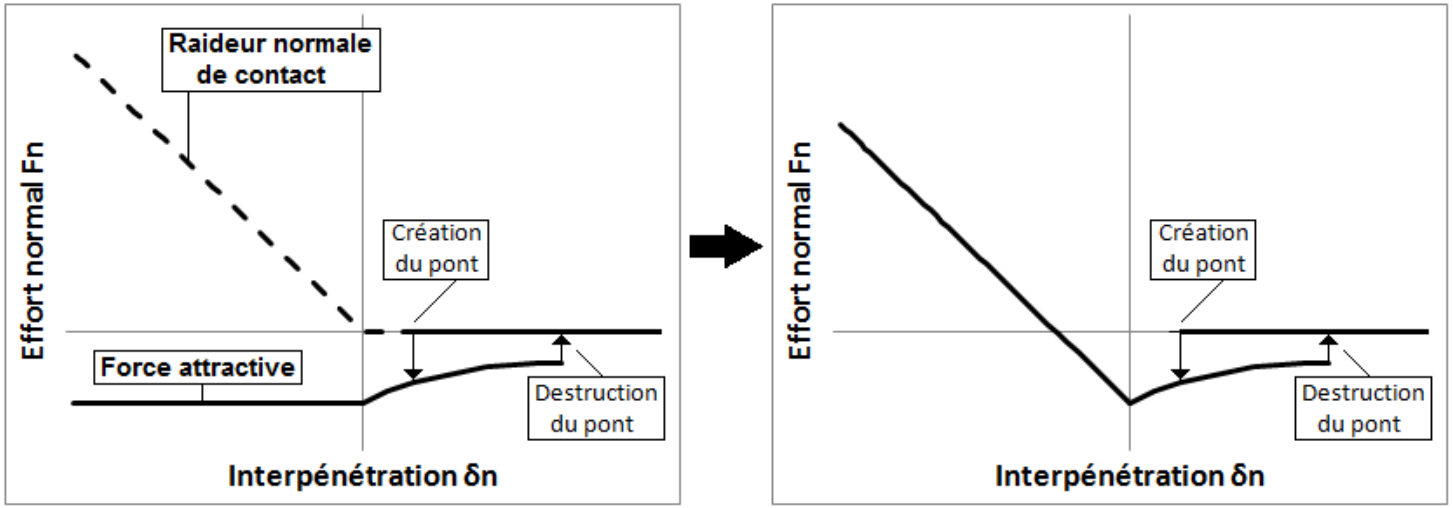
Contrairement à une loi cohésive simplifiée, on constate néanmoins que la valeur de l'effort attractif est dépendante de la distance de séparation entre les grains : lorsqu'ils s'écartent, le volume du pont capillaire reste constant, donc sa géométrie change, et notamment son rayon de gorge. Il en résulte une diminution de l'effort attractif.



Cohésion capillaire

-Milieux triphasiques
-Ponts capillaires
-Implémentation

Si on étire trop le pont capillaire, il finit par rompre (à une distance qui dépend de son volume initial et de la tension superficielle du liquide). Il ne suffit pas alors de rapprocher les grains pour le recréer, car le liquide s'est réparti sur l'ensemble du contour des grains. La distance de destruction et de création des ponts sont donc différents, ce qui est à l'origine de phénomènes hystérétiques caractéristiques des milieux non-saturés.



Modèles physiques d'adhésion

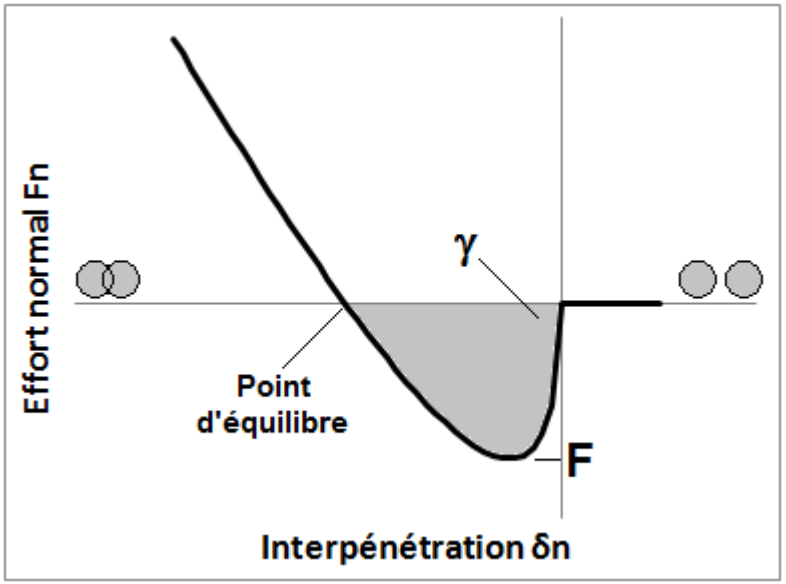
-Principes

Pour les grains de petites tailles (poudres cohésives), les efforts d'adhésion sont liés à divers facteurs physico-chimiques, qu'on résume sous la forme d'une grandeur unique nommée « énergie d'adhésion », ou « énergie de Dupré », notée γ et exprimée en J/m².

Il s'agit de l'énergie par unité de surface, nécessaire pour séparer complètement deux particules en contact.

L'effort attractif maximal peut s'estimer par la formule suivante :

$$F \approx -2\pi R^{*}\gamma$$



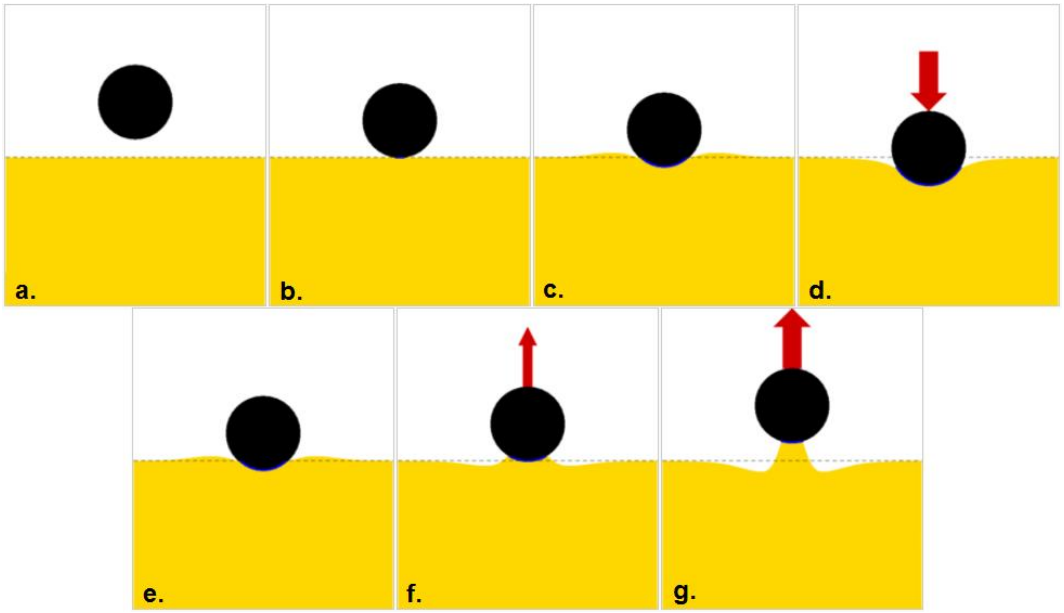
Modèles physiques d'adhésion

-Principes

-JKR

Deux modèles physiques de contact adhésif sont couramment utilisés : JKR et DMT.

Le premier (Johnson-Kendall-Roberts 1971) est fondé sur la théorie de Hertz. Il consiste à mettre en place des efforts attractifs sur les portions de surfaces en contact (définies par le rayon de Hertz).



Modèles physiques d'adhésion

-Principes

-JKR

L'approche JKR combine donc :

-l'élasticité du contact de Hertz
-l'énergie d'adhésion de Dupré

L'expression du rayon est implicite :

$$a^3 = \frac{R^*}{E^*}\left(F_n + 3\gamma\pi R^* + \sqrt{6\gamma\pi R^* F_n + (3\gamma\pi R^*)^2}\right)$$

Une forme explicite simplifiée est parfois utilisée en DEM :

$$F_n = E^* R^{*1/2} \delta_n^{3/2} - \sqrt{6\pi\gamma} \cdot E^{*1/2} R^{*3/4} \delta_n^{3/4}$$

L'effort maximal cohésif dans la liaison est alors donné par :

$$F = -\frac{3}{2}\pi R^* \gamma$$

Modèles physiques d'adhésion

-Principes
-JKR
-DMT

Le deuxième modèle le plus utilisé est le modèle DMT (Derjaguin-Müller-Toporov 1975).

Il consiste à négliger l'effet de la déformation des grains sur les efforts attractifs, et à représenter cette déformation par une interpénétration (fondée sur la loi de Hertz). L'effort maximal attractif dans la liaison est donné par :

$$F = -2\pi R^{*}\gamma$$

Les modèles JKR et DMT sont en fait des cas limites :

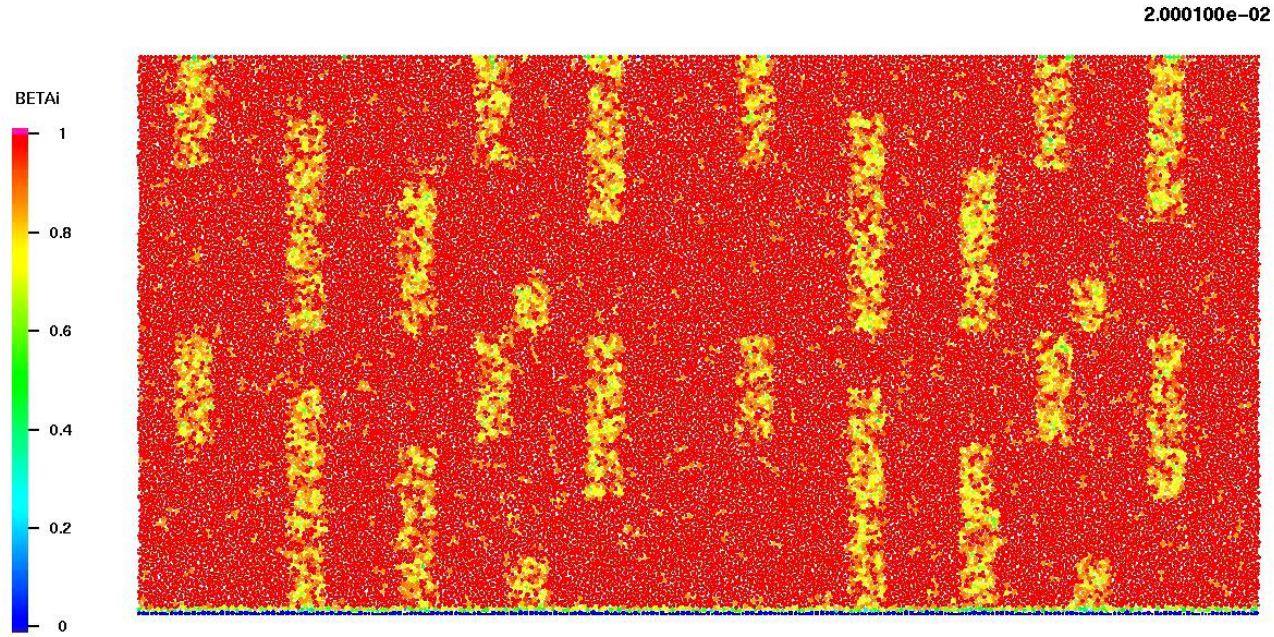
-JKR pour les grosses particules très déformables avec une énergie de surface importante

-DMT pour les petites particules rigides faiblement liées.

Plusieurs approches ont été proposées pour unifier ces modèles et représenter le continuum des situations entre les deux extrêmes.

Modèles physiques d'adhésion

-Principes
-JKR
-DMT
-CZM



Une extension consiste à mettre en place un modèle d'endommagement des liaisons. On appelle cette classe de modèles les CZM (Cohesive Zone Model).

Cette approche consiste à dégrader les propriétés d'une liaison (raideur, énergie de surface, etc.) en fonction de l'histoire des sollicitations qu'elle a subi, jusqu'à sa rupture définitive.

Elle est très utilisée pour lrs matériaux cimentés et en tribologie numérique.

Mécanique des matériaux granulaires

Grains de morphologies complexes

Génération d'échantillons complexes

-Morphologies typiques

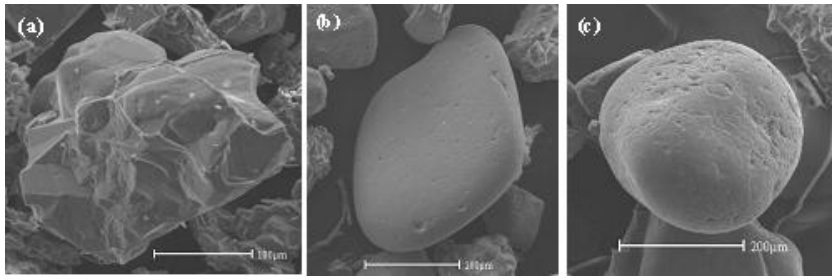
Anguleuses

Sphériques

Aplaties

Allongées

Complexes



Génération d'échantillons complexes

-Morphologies typiques

-Géométries déterminées

Dans certaines situations, les grains sont non-sphériques, mais restent parfaitement déterminés (à la fois en forme et en taille) : gélules pharmaceutiques, morceaux de sucres, etc.

Dans ce cas, on peut construire des stratégies spécifiques, adaptées à une forme donnée et à aucune autre : décomposition en formes élémentaires, sélection des différents types de contacts, etc.

L'objectif reste toujours le même : être capable en toute situation de déterminer deux éléments nécessaires à l'application d'une loi de contact :

-La distance de séparation/interpénétration

-Le repère local du contact (directions normale et tangentielles)

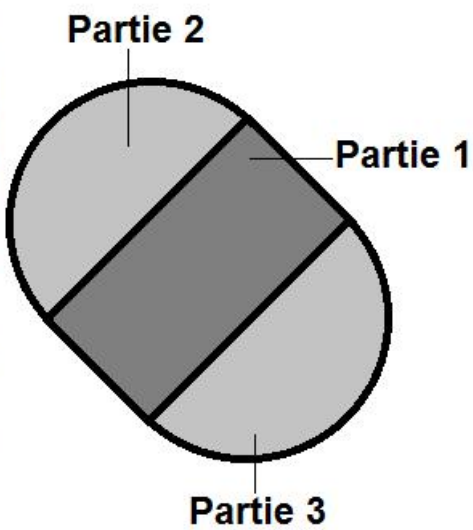
Génération d'échantillons complexes

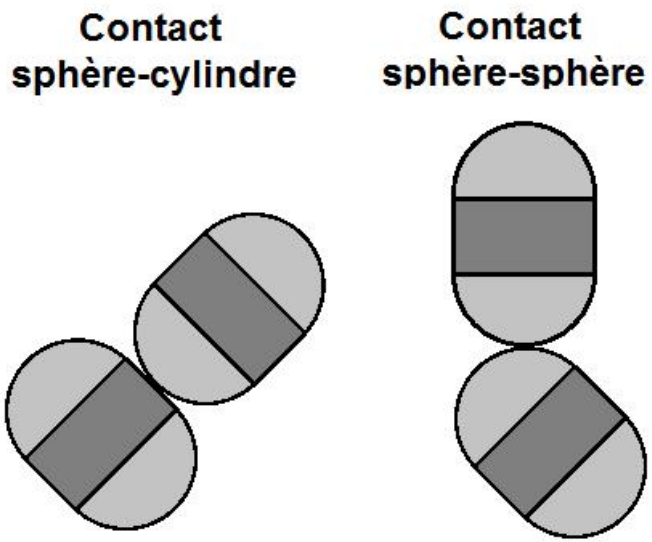
-Morphologies typiques

-Géométries déterminées

Pour les gélules pharmaceutiques, par exemple, la forme est facilement décomposable en un cylindre et deux demi-sphères.

Les contacts peuvent se décomposer en trois catégories simples (sphère-sphère, cylindre-cylindre, sphère-cylindre), pour lesquelles le repère local et la distance d'interpénétration sont univoques.





Génération d'échantillons complexes

-Morphologies typiques
-Géométries déterminées
-Géométries indéterminées

Dans beaucoup d'autres cas, la géométrie des grains n'est pas déterminée, bien que n'étant pas totalement inconnue.

On peut la caractériser par exemple par certaines données morphologiques (élongation, circularité, etc.)

C'est le cas des géomatériaux (argiles, sables, granulats, etc.)

Pour une reproduction fidèle de leurs comportements, il est parfois nécessaire d'introduire des formes réalistes dans leurs modélisations DEM.

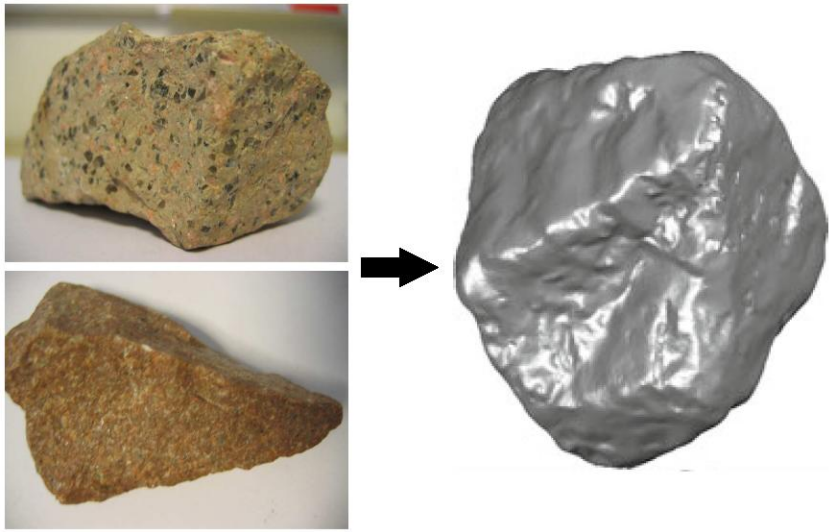
Génération d'échantillons complexes

-Morphologies typiques
-Géométries déterminées
-Géométries indéterminées
-Catalogues de formes

Une technique consiste à se constituer une bibliothèque de formes de grains représentatives d'un matériau donné, que l'on peut ensuite utiliser en l'état dans un modèle discret.

C'est par exemple l'approche utilisée par la SNCF pour modéliser ses ballasts de voies.

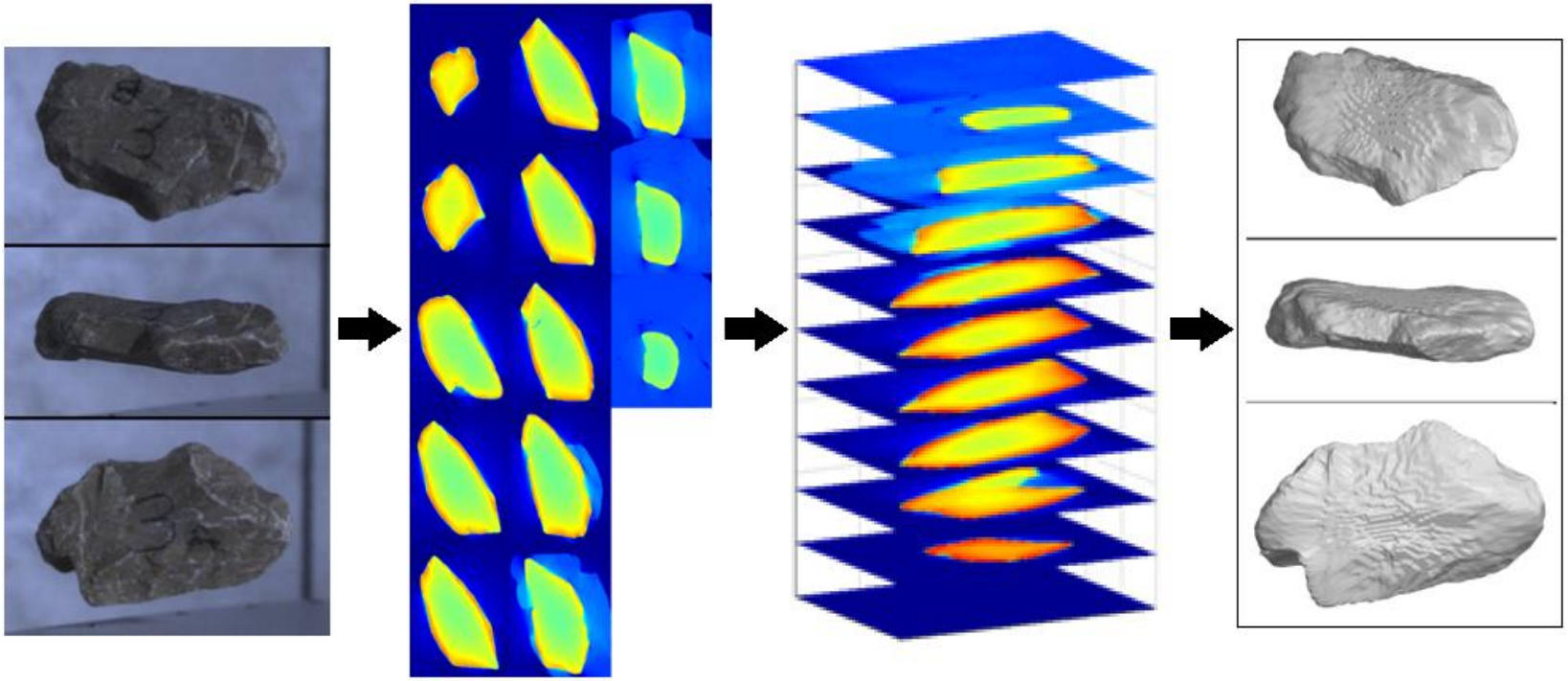
L'échantillon généré n'est pas totalement aléatoire (il pioche dans une bibliothèque finie de quelques dizaines de formes), mais on le suppose représentatif du matériau réel.



Génération d'échantillons complexes

-Morphologies typiques
-Géométries déterminées
-Géométries indéterminées
-Catalogues de formes

La difficulté majeure reste l'acquisition 3D de formes de grains réels. On peut utiliser certains scanners 3D, ou de la tomographie à rayons X, par exemple.

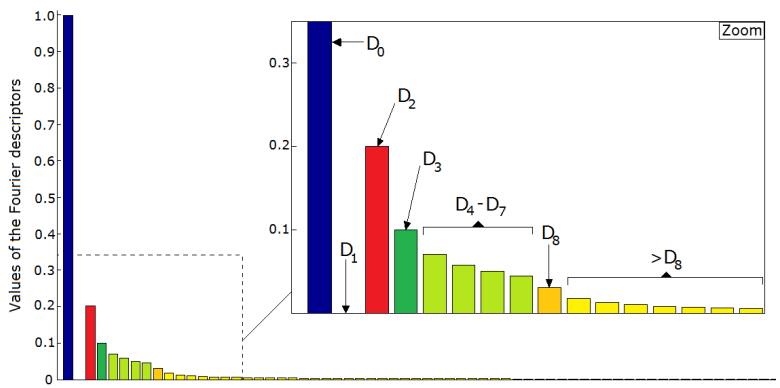


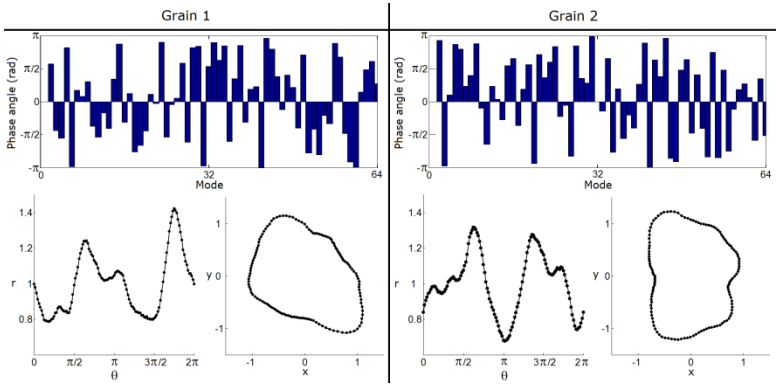
Génération d'échantillons complexes

-Morphologies typiques
-Géométries déterminées
-Géométries indéterminées
-Catalogues de formes
-Méthodes spectrales

Une autre technique émergente consiste à générer les formes aléatoirement, tout en s'assurant qu'elles respectent certaines propriétés morphologiques caractéristiques du matériau ciblé.

On peut par exemple s'appuyer sur la méthode des descripteurs de Fourier, qui propose une caractérisation spectrale des formes, et « renverser le processus », c'est-à-dire créer des formes à partir d'un spectre donné.





Génération d'échantillons complexes

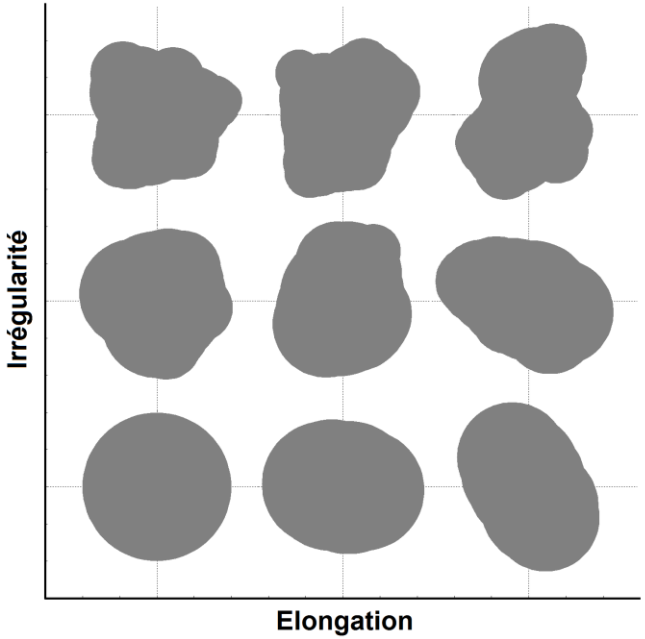
-Morphologies typiques
-Géométries déterminées
-Géométries indéterminées
-Catalogues de formes
-Méthodes spectrales

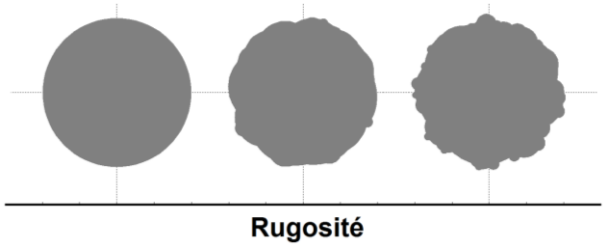
Par un contrôle précise du spectre utilisé en entrée (qui peut par exemple être obtenu par mesure sur un nombre suffisamment important de grains d'un matériau donné), on peut contrôler les différentes échelles morphologiques du grain :

-Elongation

-Irrégularité

-Rugosité

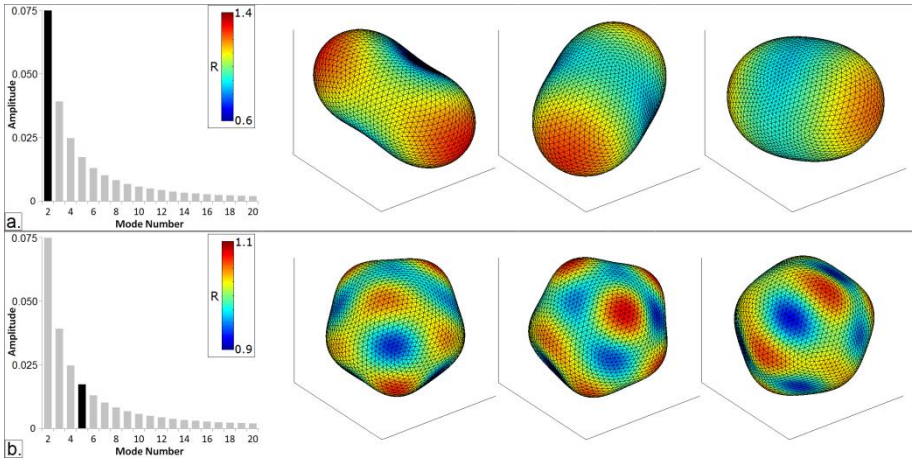


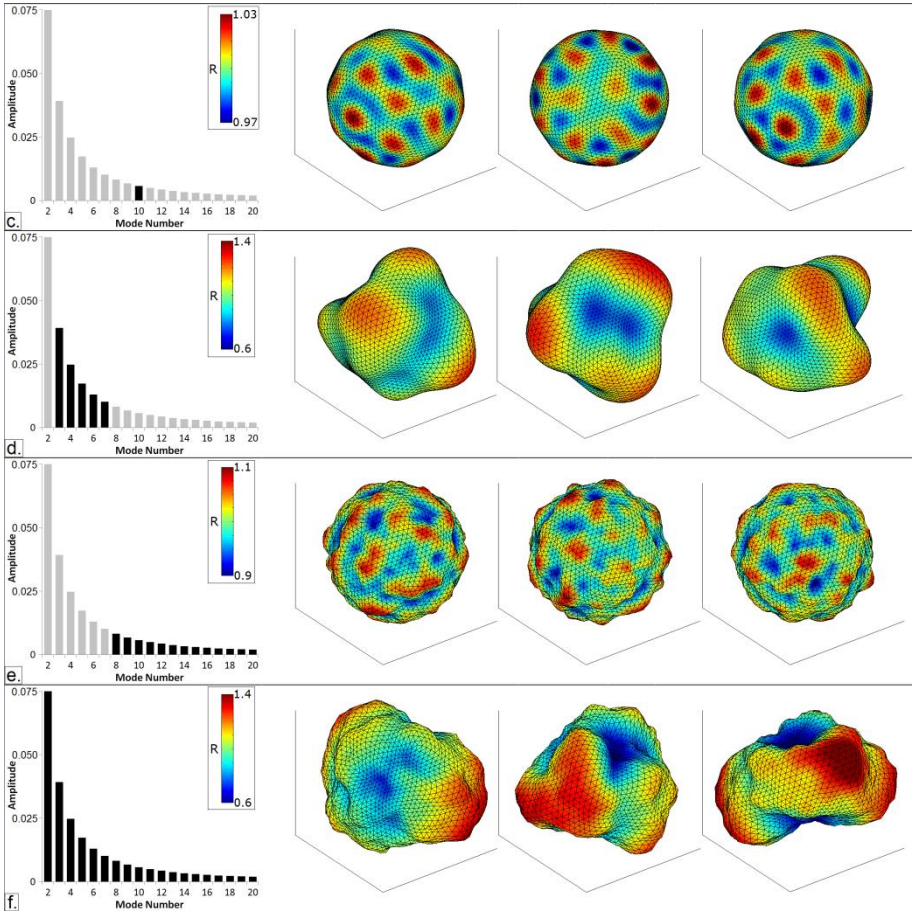


Génération d'échantillons complexes

-Morphologies typiques
-Géométries déterminées
-Géométries indéterminées
-Catalogues de formes
-Méthodes spectrales

La méthode a également été étendue à la 3D, par l'intermédiaire de la théorie des champs aléatoires.

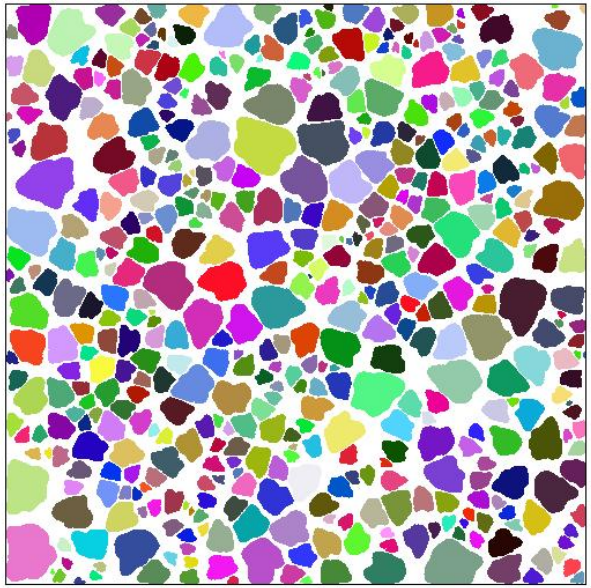




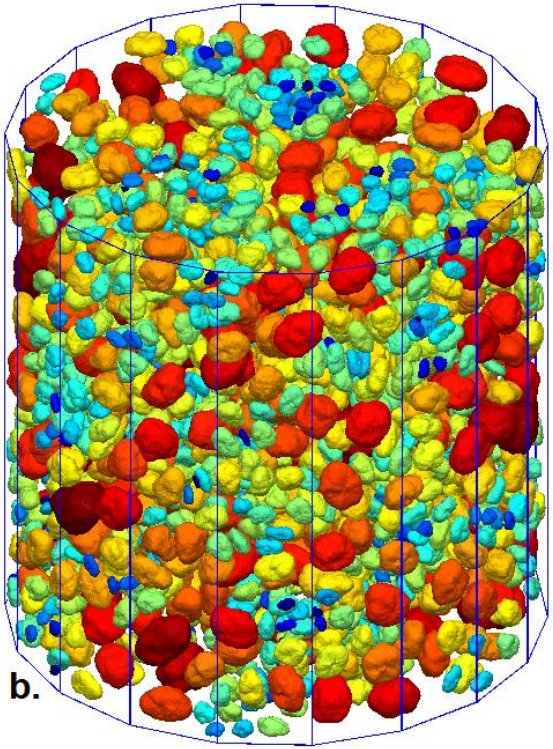
Génération d'échantillons complexes

- -Morphologies typiques
- -Géométries déterminées
- -Géométries indéterminées
- -Catalogues de formes
- **-Méthodes spectrales**

En couplant cette méthode de génération avec des approches de packing appropriées, on sait maintenant générer des échantillons à la fois denses et réalistes, en 2D et en 3D.



a.



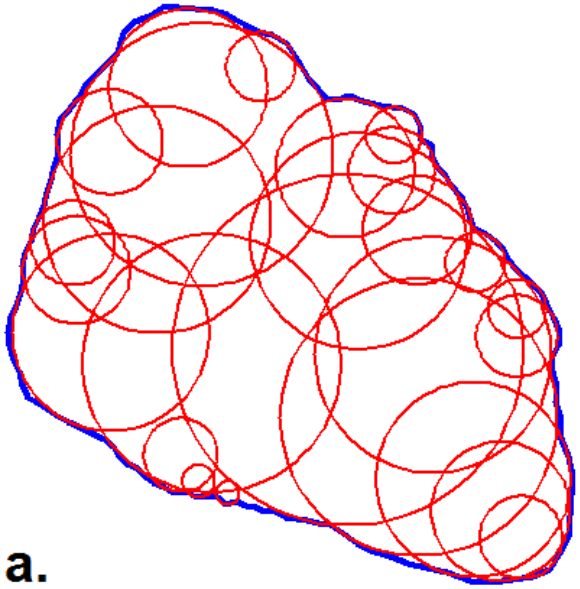
b.

Modélisation par clusters de disques ou de sphères

-Principe

Avoir généré un échantillon réaliste n'est pas suffisant : encore faut-il être capable de l'implémenter dans un code DEM (c'est-à-dire calculer un repère local un contact et une distance d'interpénétration.

La méthode la plus utilisée pour cette implémentation est celle des clusters de disques ou de sphères, aussi appelés « clumps ».



a.

Modélisation par clusters de disques ou de sphères

-Principe

Avec une telle approche, chaque contact peut être représenté par une interaction disque-disque (ou sphère-sphère), soit une situation parfaitement maîtrisée.

Lorsque deux grains sont à proximité, le contact peut donc être calculé en balayant les différentes combinaisons de distances entre disques/sphères appartenant à chaque grain.

L'approche donne par ailleurs la possibilité de gérer des contacts multiples au sein de chaque paire de grains, si ceux-ci sont non-convexes.

Il faut en revanche s'assurer que les propriétés dynamiques de la particule (mass et matrice d'inertie) sont celles de sa géométrie d'origine, et non pas la somme de celles des disques/sphères qui la composent. Ceux-ci se recouvrent largement, et n'ont pas de sens dynamique : ils ne servent que de « contacteur ».

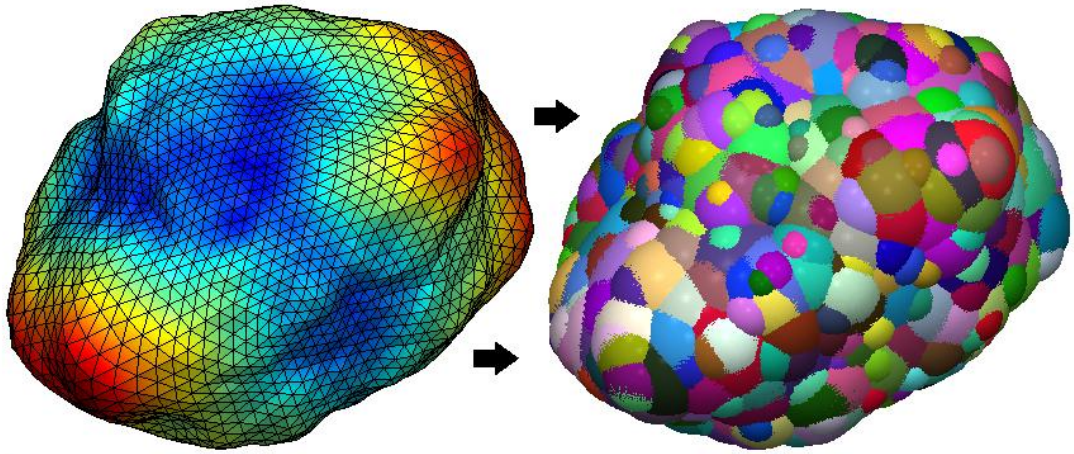
Modélisation par clusters de disques ou de sphères

-Principe

On peut trouver deux défauts à cette technique :

-Le contour réel des grains générés n'est qu'approximatif. En particulier, leur courbure locale n'est pas correctement représentée.

-Selon la complexité du contour, on aura besoin de 20 à 30 disques en 2D, et de 200 à 400 sphères en 3D, ce qui peut représenter un coût calculatoire important.



b.

Modélisation par clusters de disques ou de sphères

-Principe

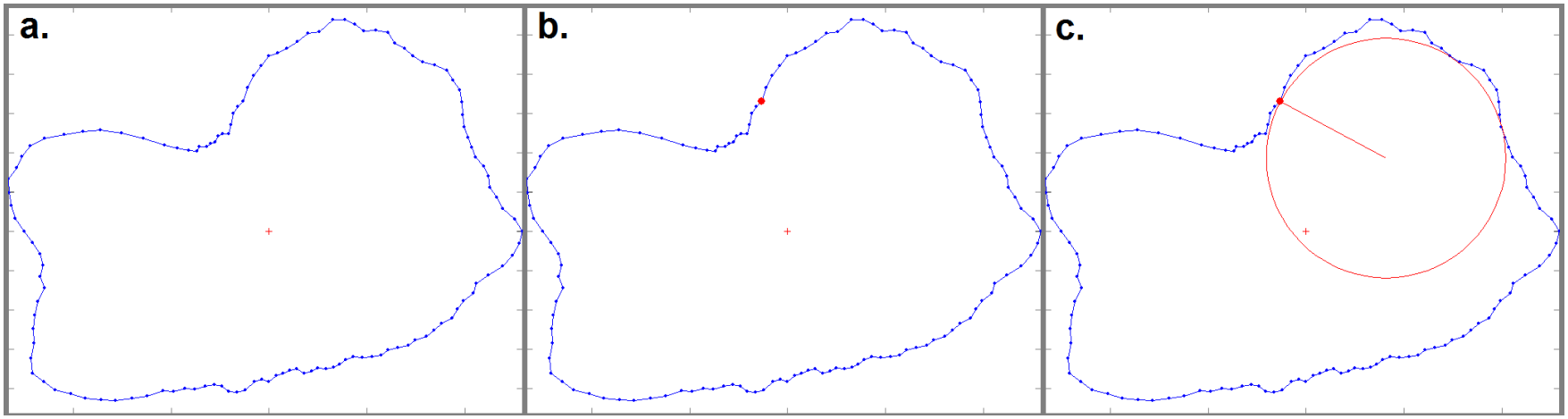
-Algorithme de remplissage

L'algorithme de remplissage suit la logique suivante, à la fois en 2D et en 3D :

a. Discrétiser finement le contour de la particule en un grand nombre de points

b. Choisir aléatoirement un point du contour

c. Définir le cercle $\mathcal{C}$ de plus grand rayon tangent au contour en ce point, et également en contact avec une ou plusieurs autres zones du contour.



Modélisation par clusters de disques ou de sphères

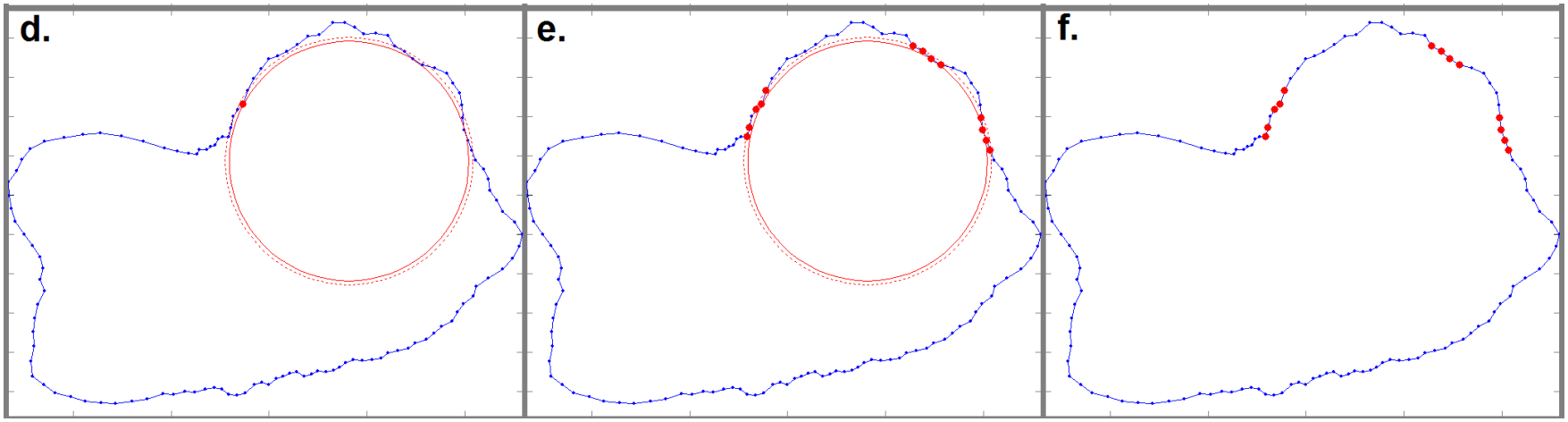
-Principe

-Algorithme de remplissage

d. Considérer un cercle $\mathcal{C}'$ concentrique à $\mathcal{C}$ mais légèrement plus grand

e. Déterminer l'ensemble des points contenus à l'intérieur de $\mathcal{C}'$

f. Marquer tous ces points comme « couverts » par le cercle $\mathcal{C}$



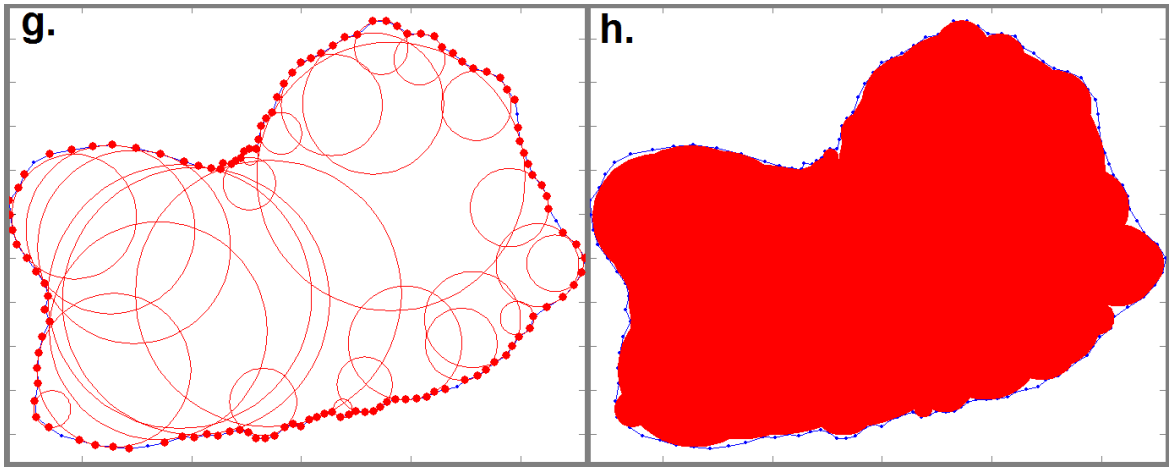
Modélisation par clusters de disques ou de sphères

-Principe

-Algorithme de remplissage

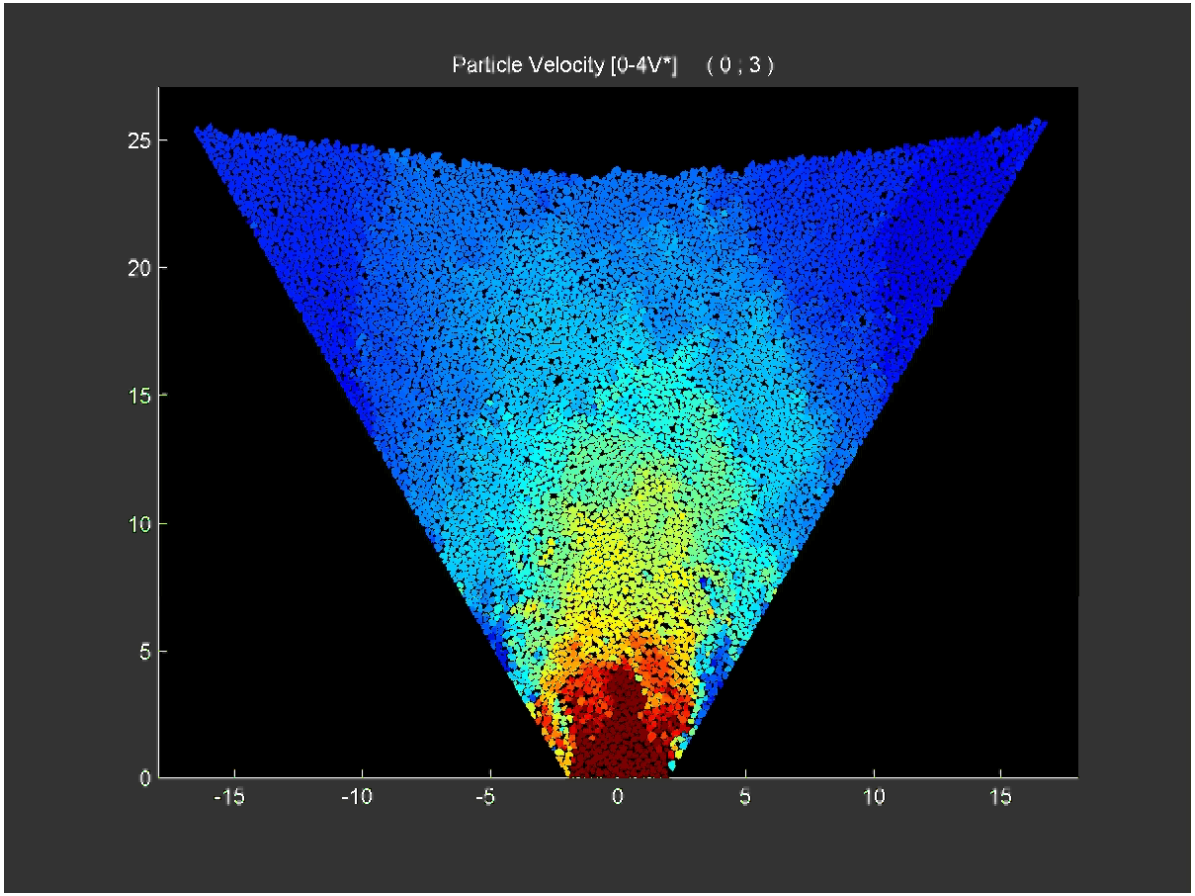
g. Boucler sur les étapes b. à f. avec les points non-couverts, jusqu'à ce que tous le soient

h. L'ensemble des cercles $\mathcal{C}$ représente le cluster recherché



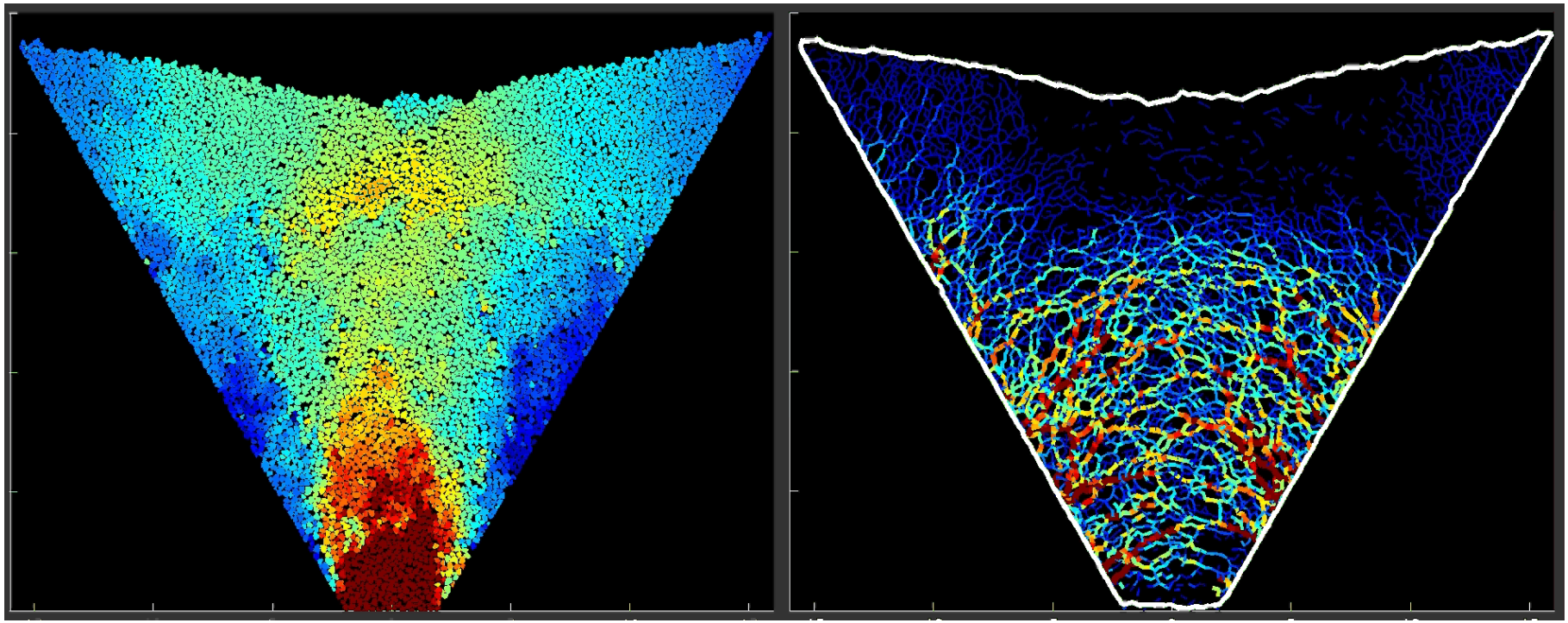
Modélisation par clusters de disques ou de sphères

-Principe
-Algorithme de remplissage
-Exemples



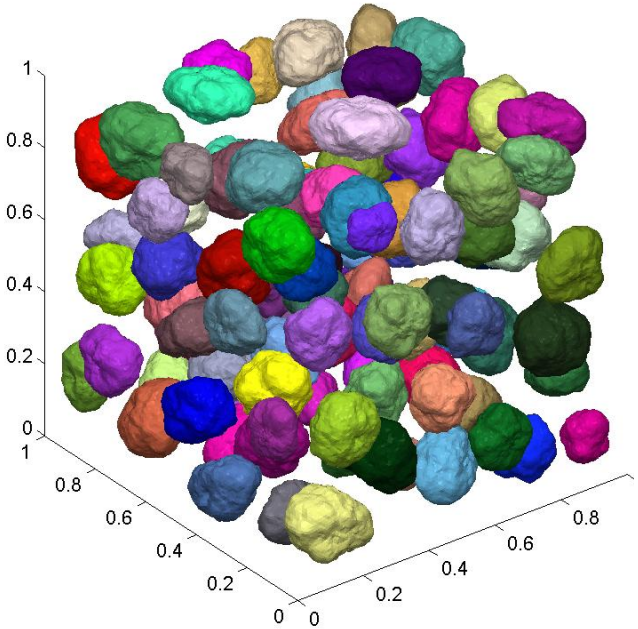
Modélisation par clusters de disques ou de sphères

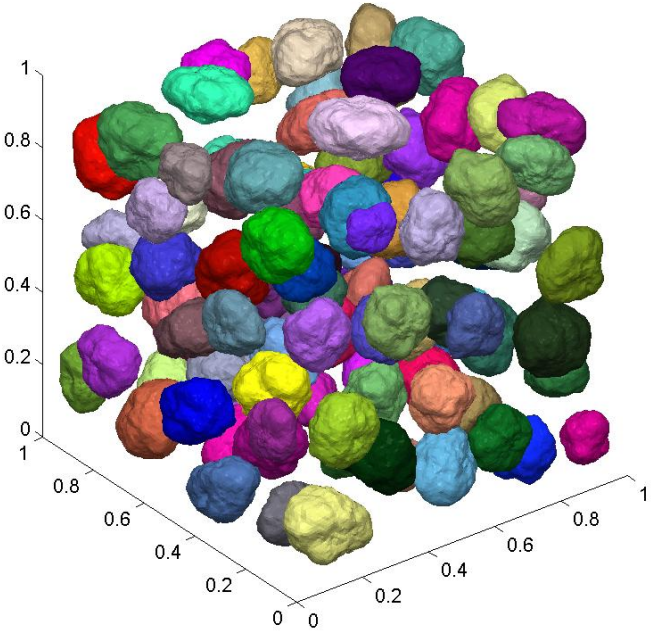
-Principe
-Algorithme de remplissage
-Exemples



Modélisation par clusters de disques ou de sphères

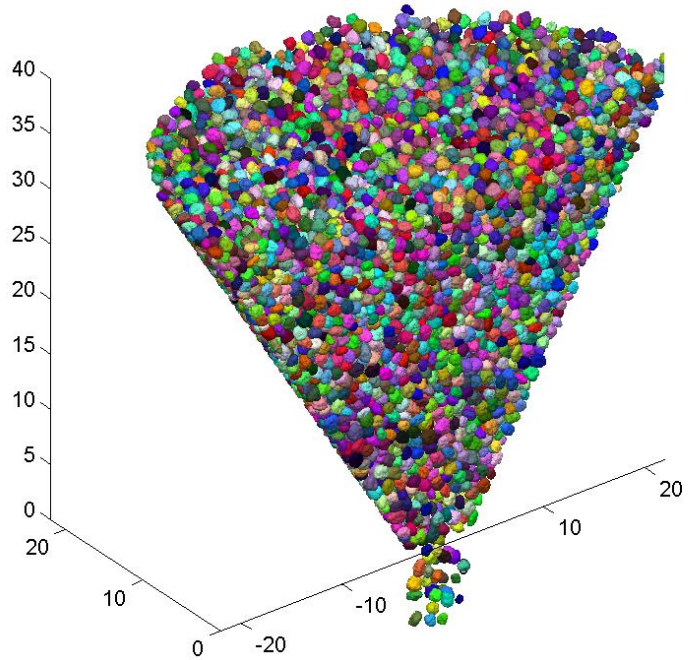
-Principe
-Algorithme de remplissage
-Exemples





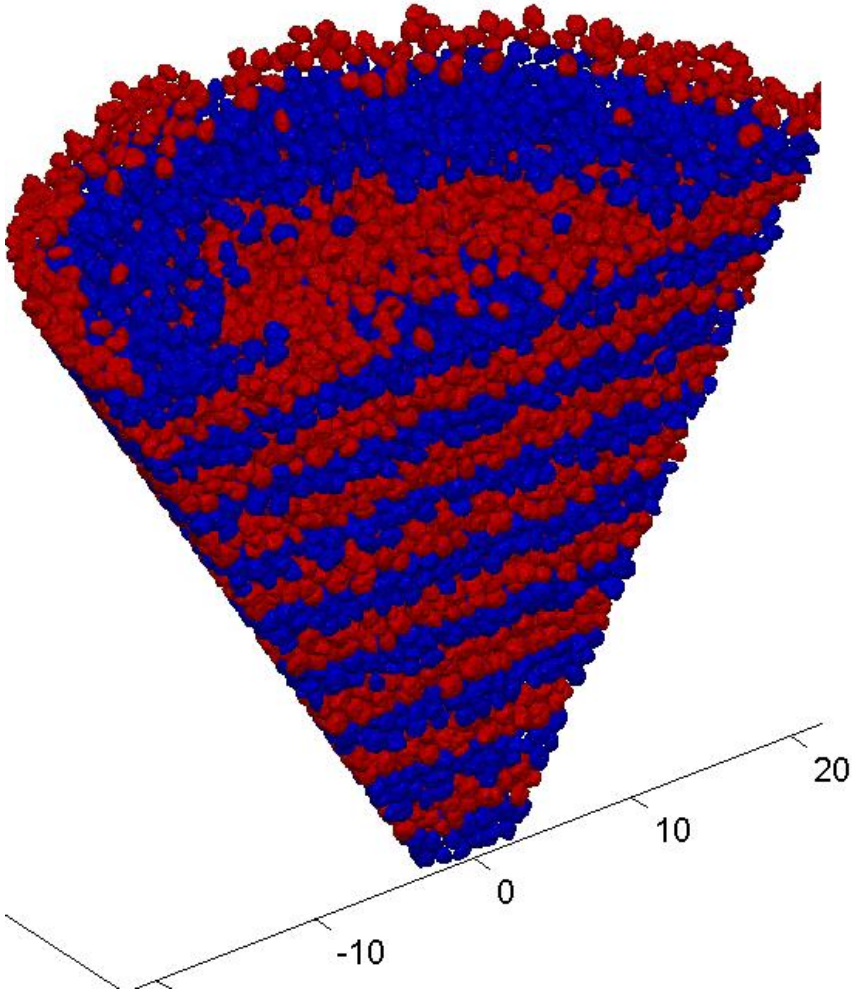
Modélisation par clusters de disques ou de sphères

-Principe
-Algorithme de remplissage
-Exemples



Modélisation par clusters de disques ou de sphères

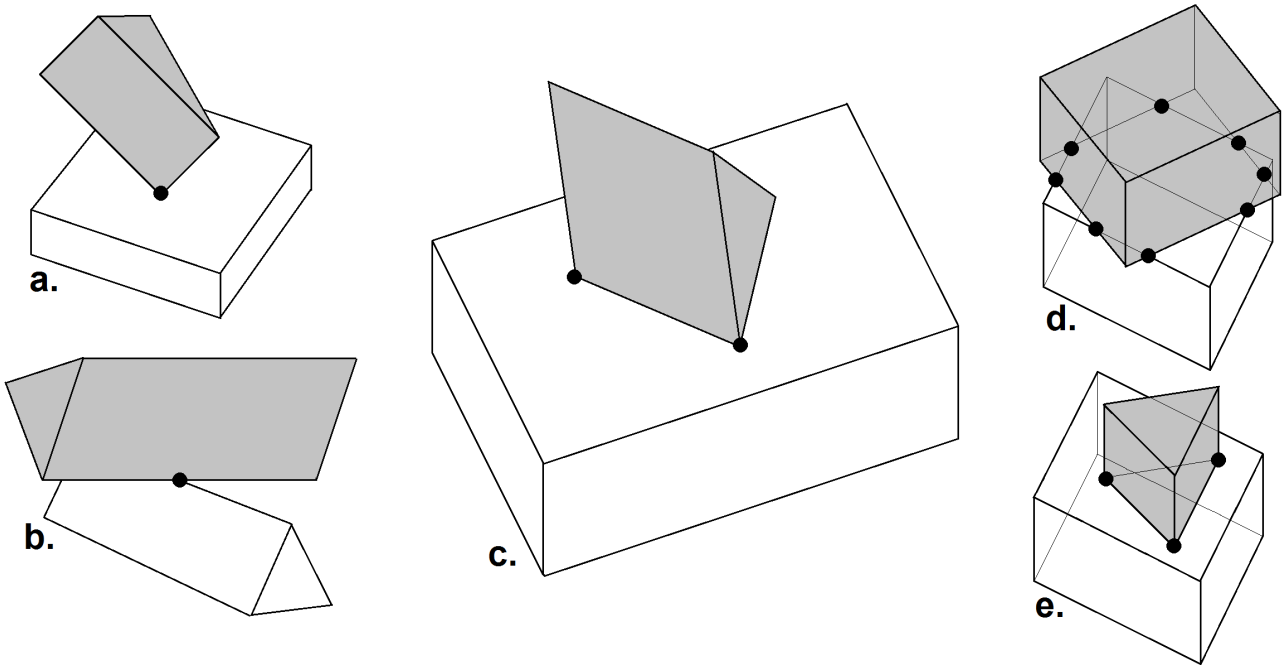
-Principe
-Algorithme de remplissage
-Exemples



Modélisation par polygones ou polyèdres

-Polyèdres

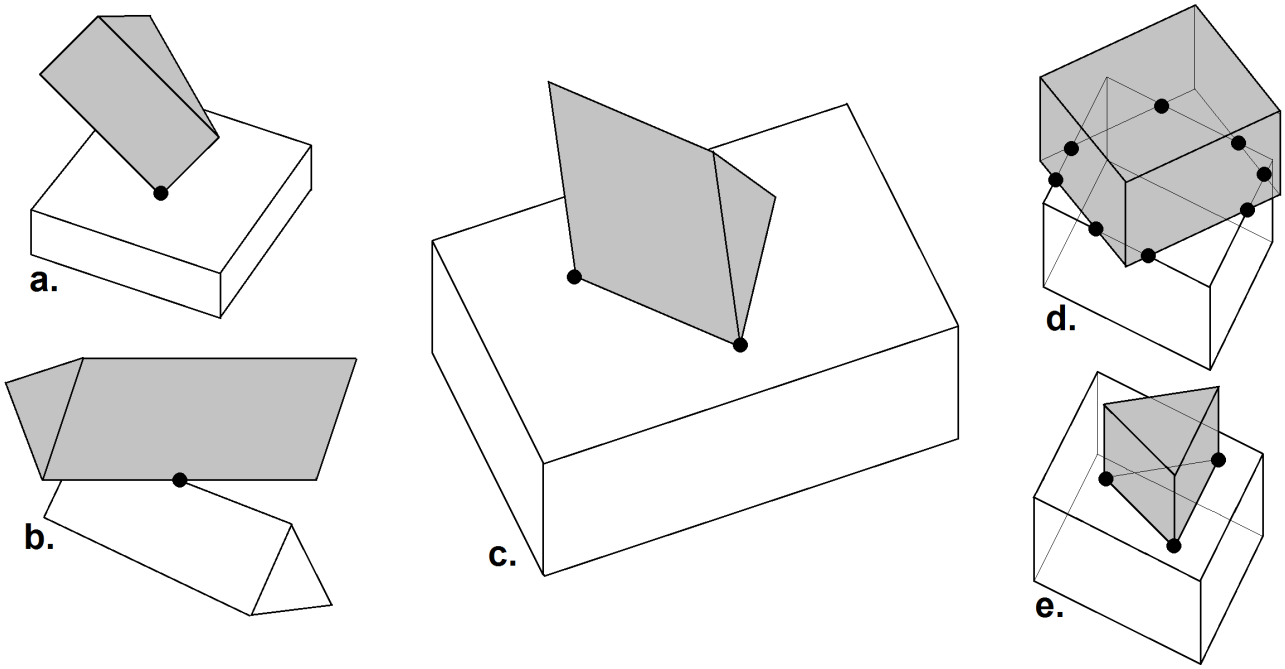
Une approche alternative à celle des clusters consiste à représenter les grains de formes complexes par des polygones (en 2D) ou des polyèdres (en 3D). Dans ce cas, chaque contact peut entrer dans une catégorie bien définie. Par exemple en 3D : contacts ponctuels, contacts linéiques, ou contacts surfaciques.



Modélisation par polygones ou polyèdres

-Polyèdres

En réalité, chaque contact non-ponctuel est traité comme la superposition de plusieurs contacts ponctuels aux intersections entre arêtes. Ceci permet d'éviter les interpénétrations tout en utilisant des lois de contact générales (i.e. valables pour les contacts ponctuels).

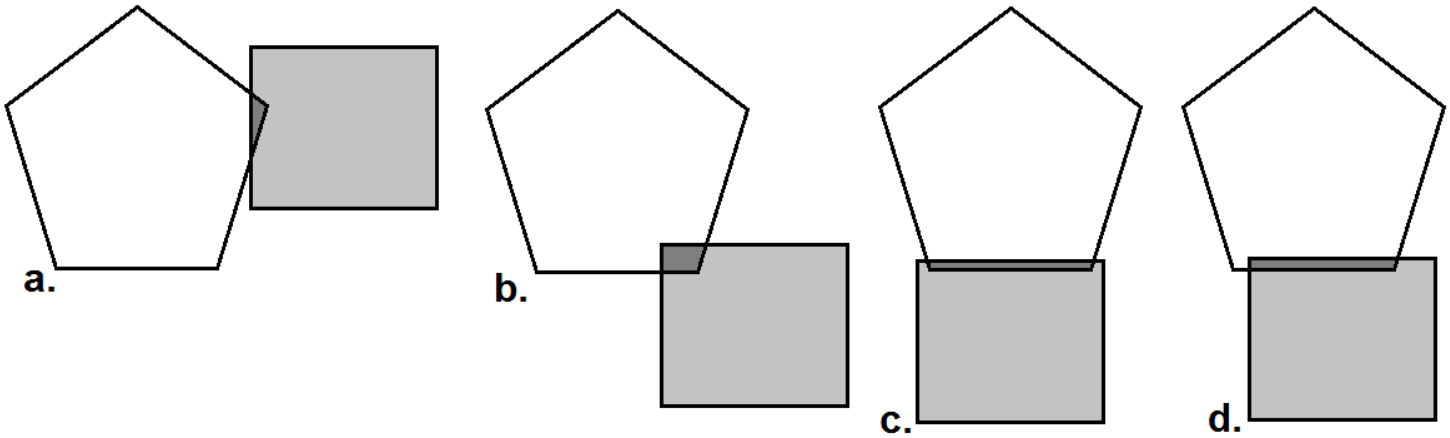


Modélisation par polygones ou polyèdres

-Polyèdres

En 2D comme en 3D, la difficulté principale lors de la résolution d'un contact reste la définition univoque de la distance d'interpénétration et de la direction normale au contact.

Ces données ne peuvent pas être calculées directement en l'absence de courbure locale de l'enveloppe du grain. Des stratégies existent, mais elles ne sont pas toujours satisfaisantes.

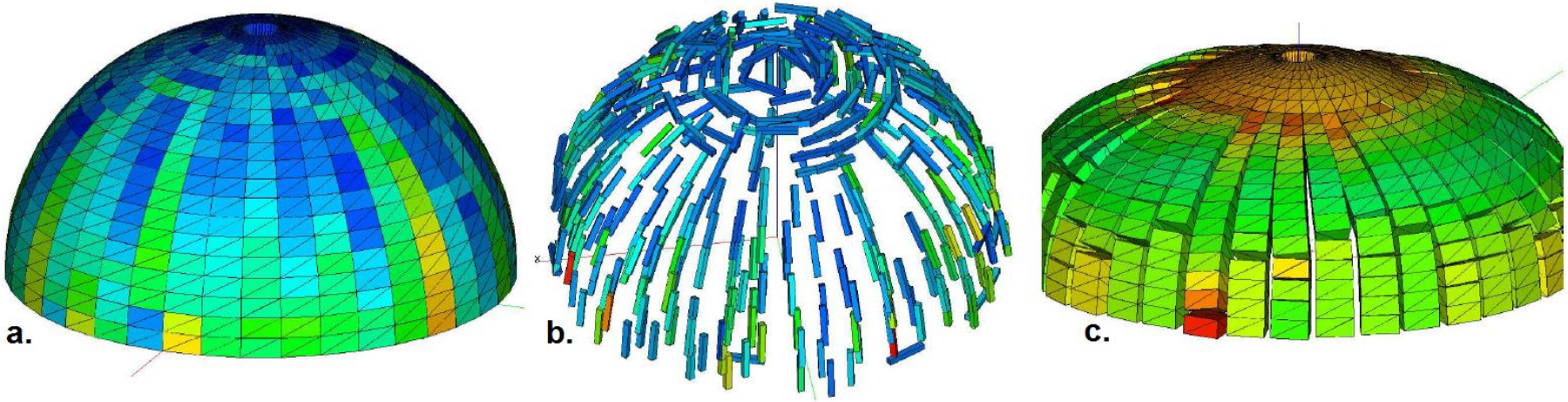


Modélisation par polygones ou polyèdres

-Polyèdres

La présence de facettes planes est un inconvénient sur le plan calculatoire, mais ouvre des perspectives intéressantes dans de nombreux domaines, comme par exemple celui de la construction maçonnée.

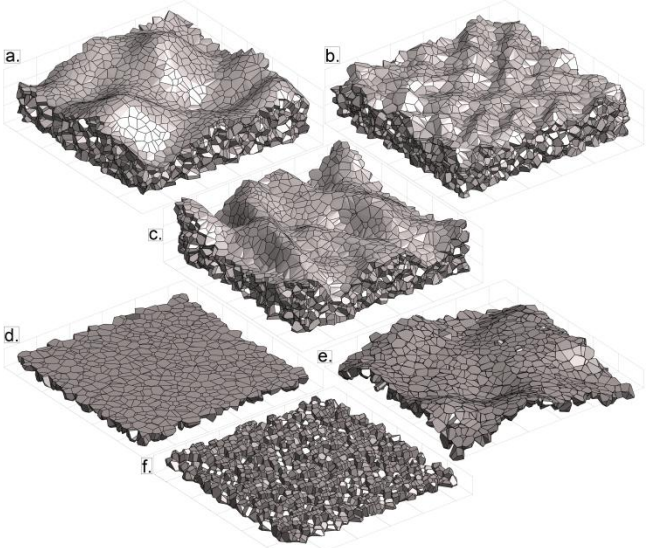
C'est également la seule méthode qui permette de représenter raisonnablement les grains très anguleux et « facettés », contrairement aux clusters qui ont toujours une courbure locale.

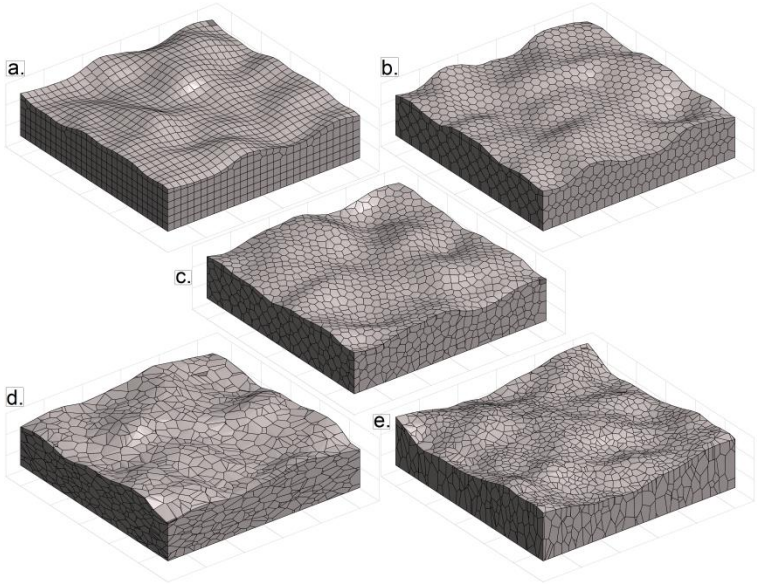


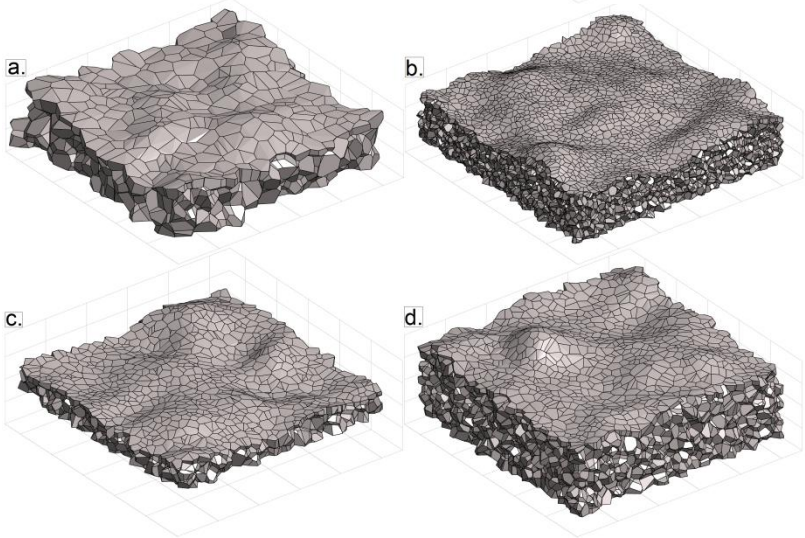
Modélisation par polygones ou polyèdres

-Polyèdres
-Applications tribologiques et géomécaniques

Les polyèdres présentent aussi l'avantage de pouvoir former un continuum à l'état initial. Ils se prêtent donc bien à l'étude de la rupture ou de l'usure des matériaux soumis à du frottement.





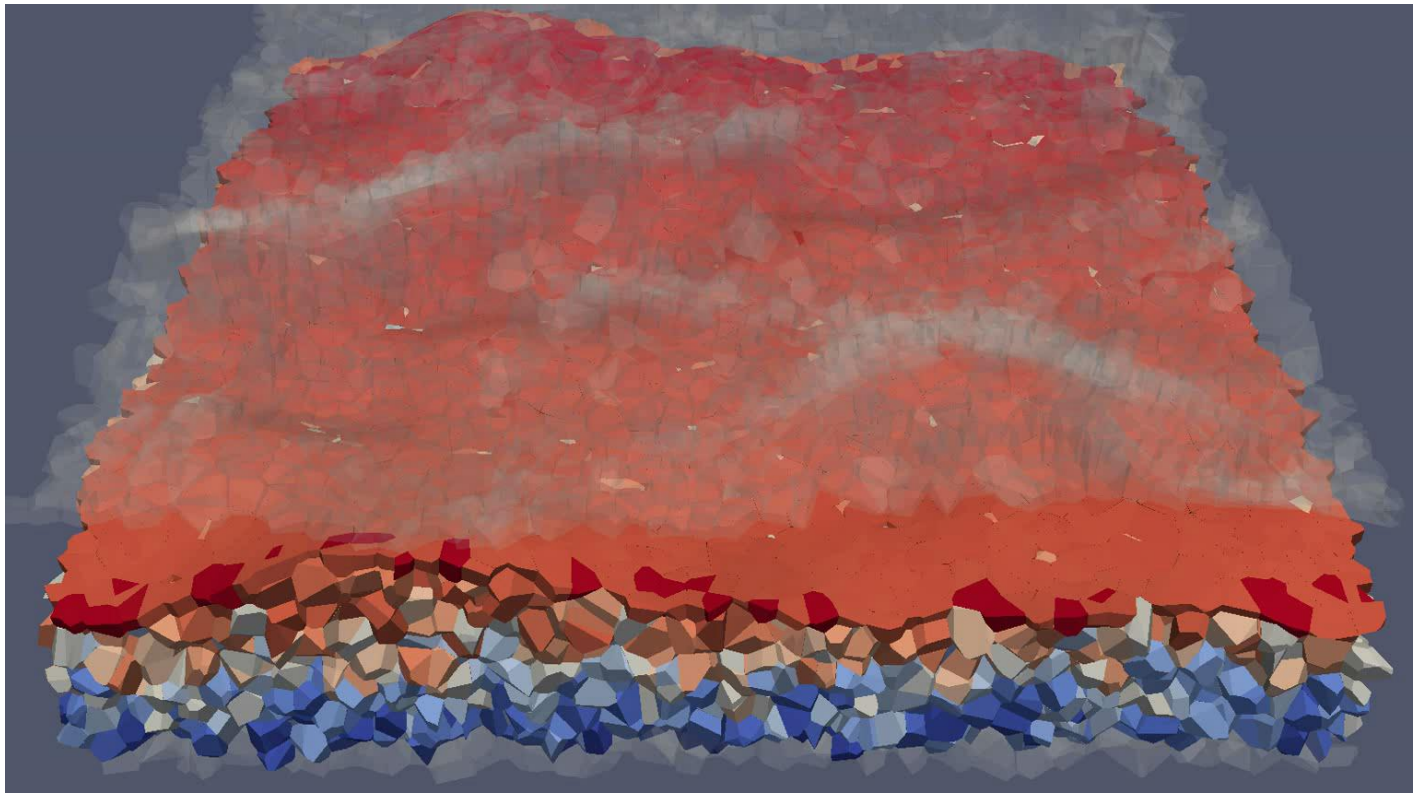


Modélisation par polygones ou polyèdres

-Polyèdres

-Applications tribologiques et géomécaniques

Frottement sous faible pression de contact

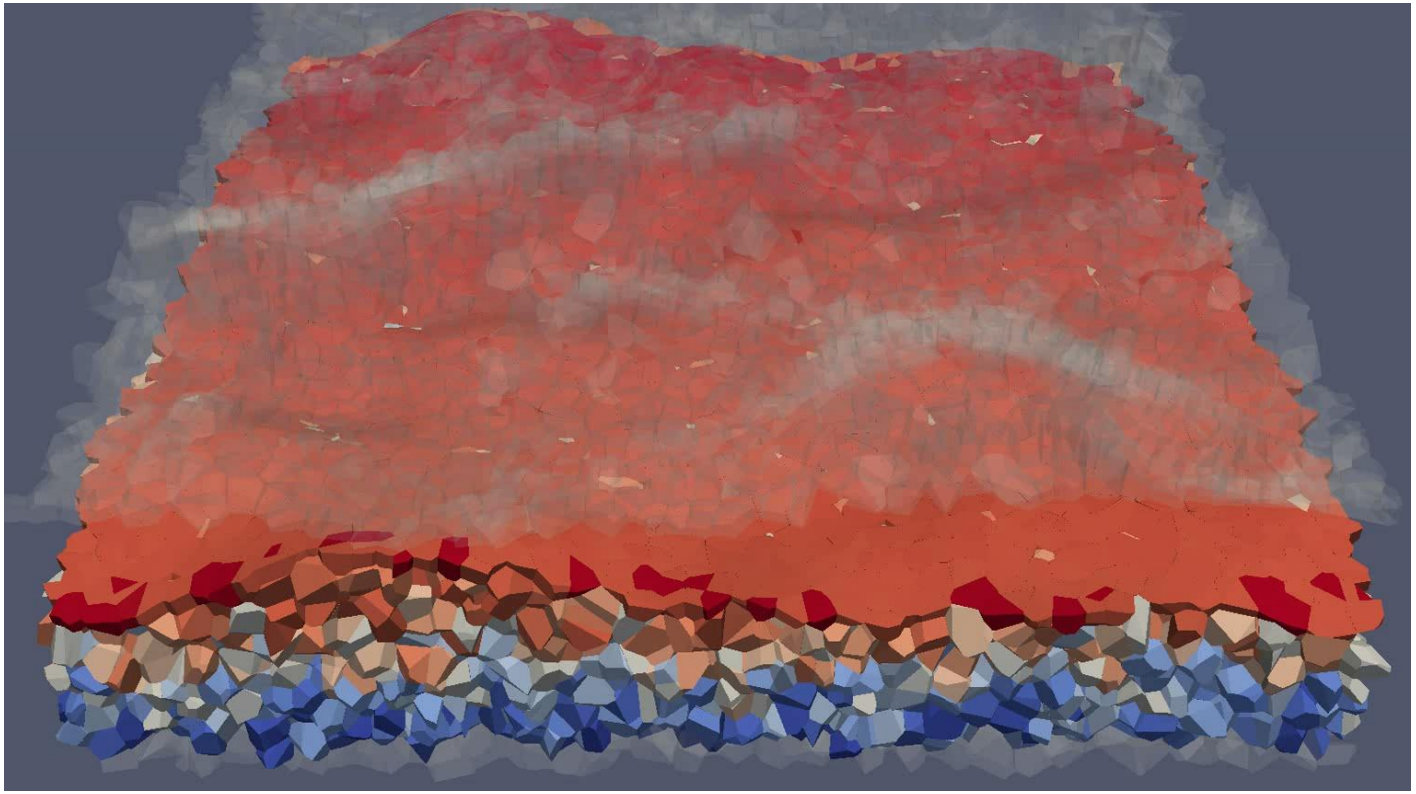


Modélisation par polygones ou polyèdres

-Polyèdres

-Applications tribologiques et géomécaniques

Frottement sous pression de contact modérée

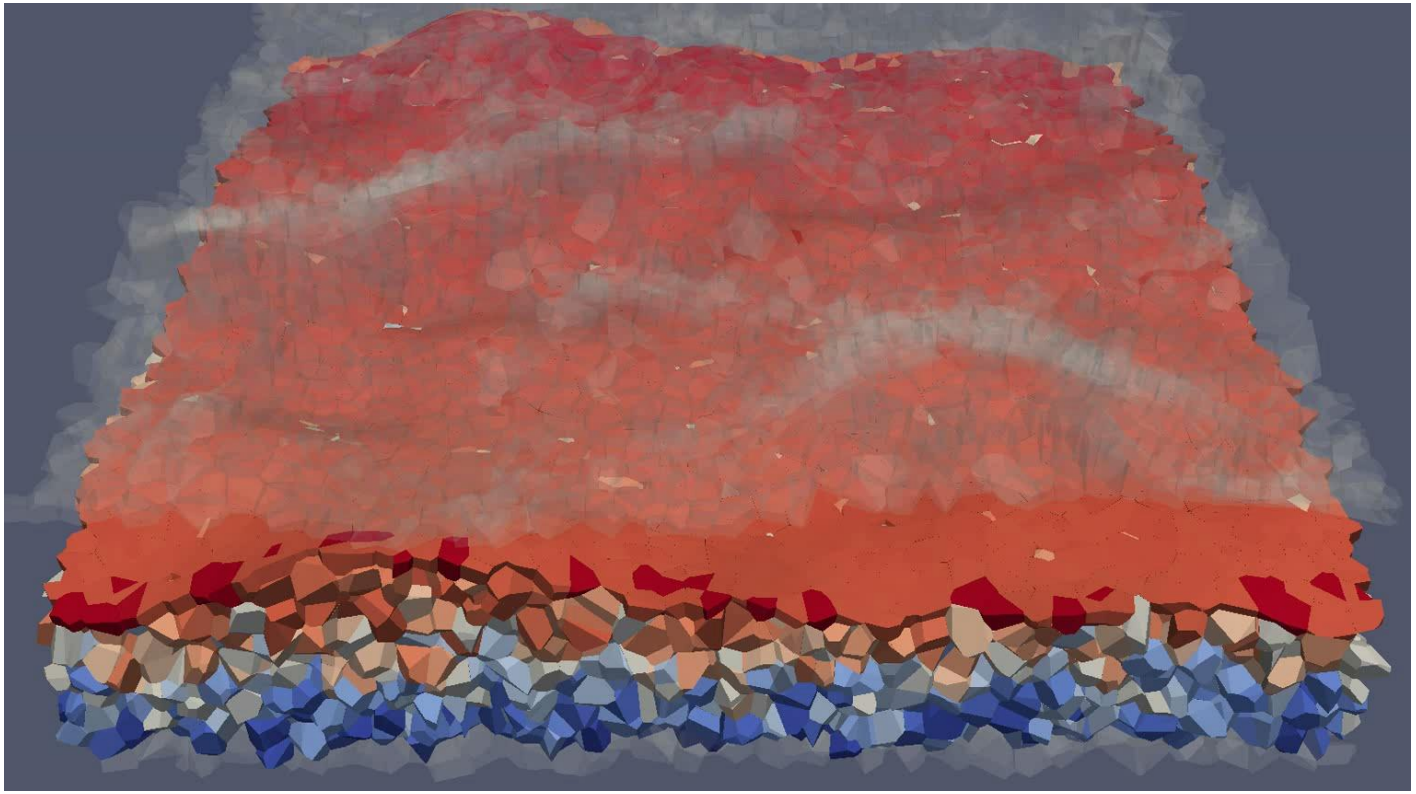


Modélisation par polygones ou polyèdres

-Polyèdres

-Applications tribologiques et géomécaniques

Frottement sous haute pression de contact

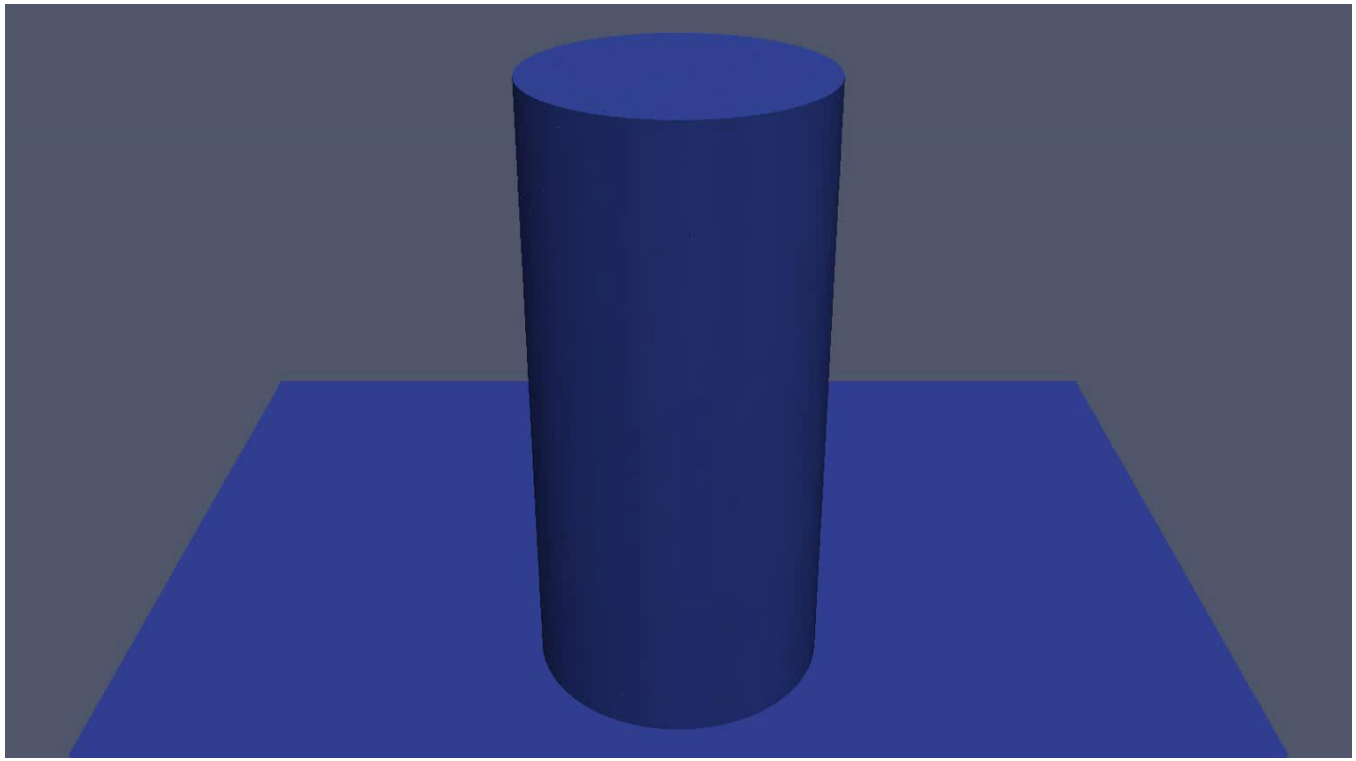


Modélisation par polygones ou polyèdres

-Polyèdres

-Applications tribologiques et géomécaniques

Les propriétés à la rupture des matériaux modélisés en DEM peuvent être calibrés sur des essais types : essai de compression, essai brésilien, essai de traction, etc.

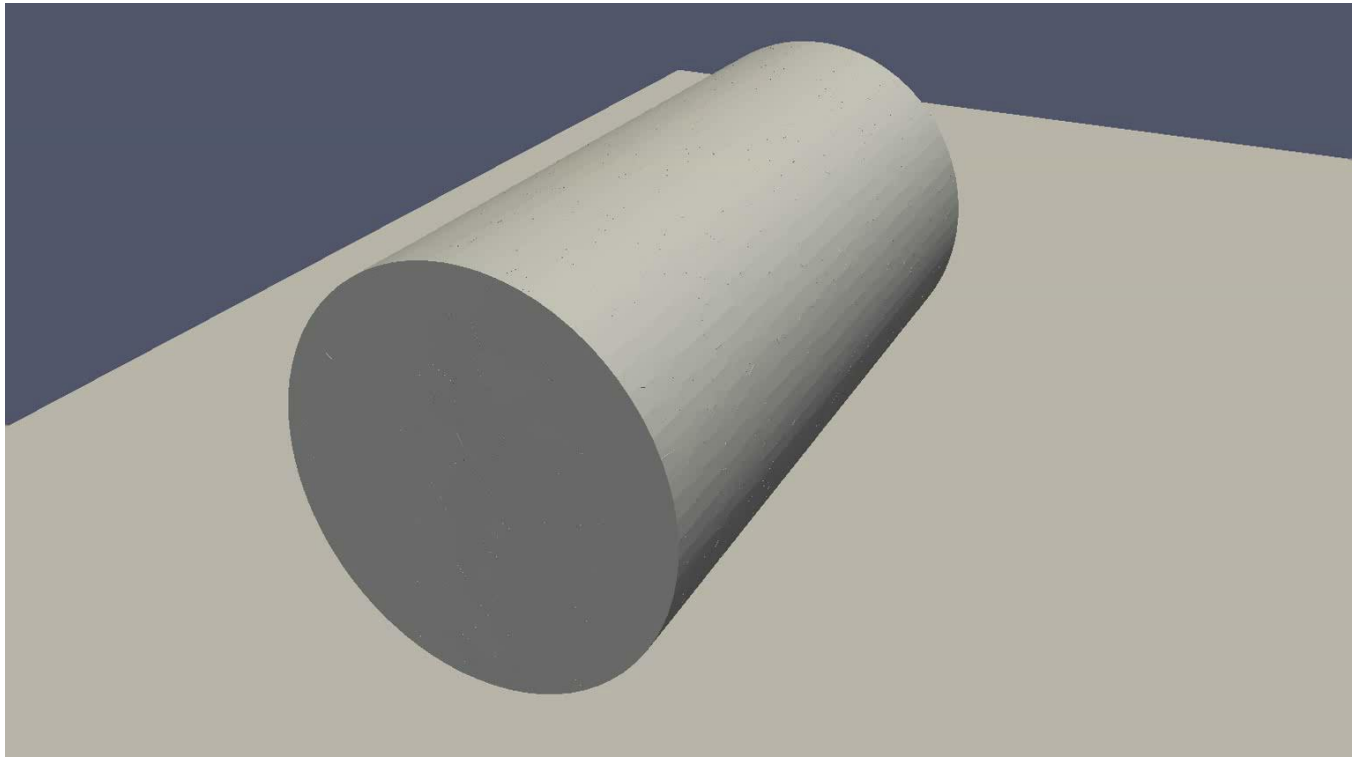


Modélisation par polygones ou polyèdres

-Polyèdres

-Applications tribologiques et géomécaniques

Les propriétés à la rupture des matériaux modélisés en DEM peuvent être calibrés sur des essais types : essai de compression, essai brésilien, essai de traction, etc.

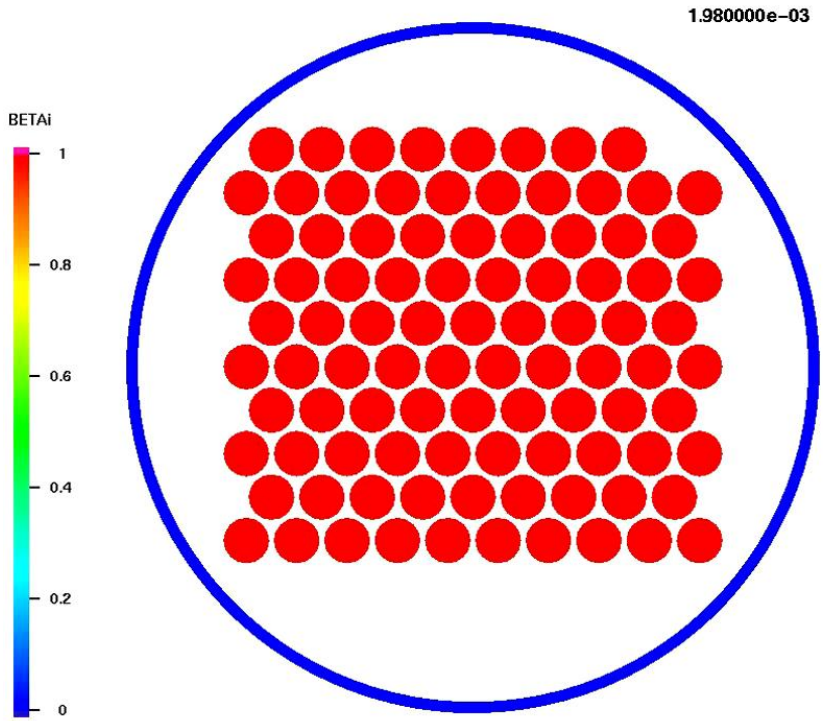


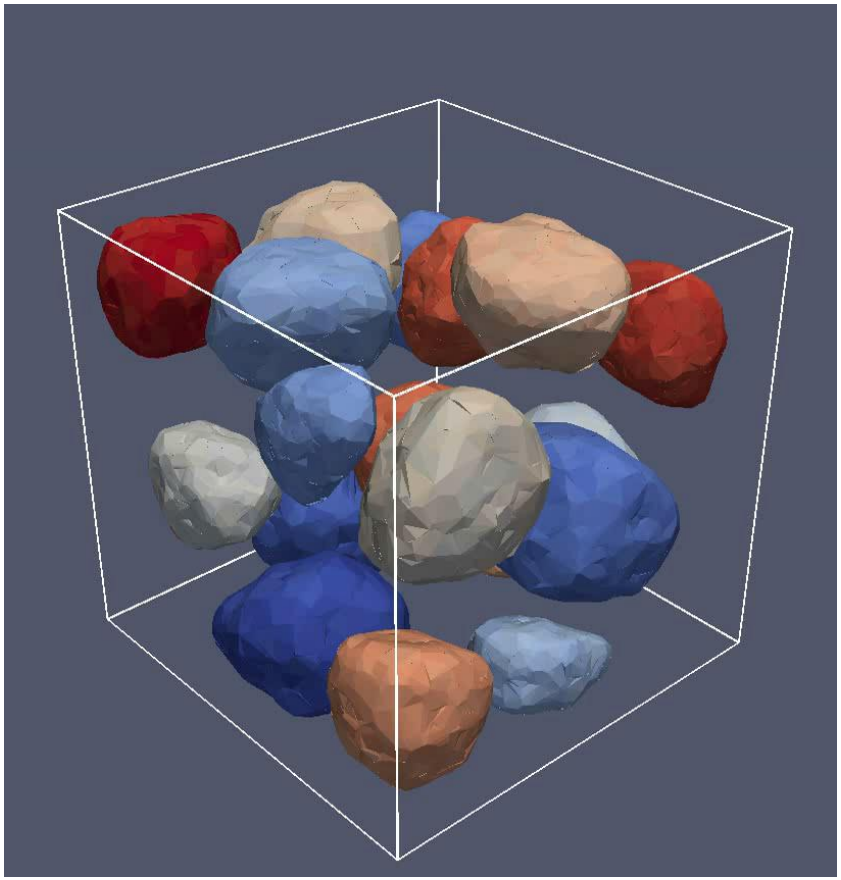
Modélisation par polygones ou polyèdres

-Polyèdres

-Applications tribologiques et géomécaniques

On peut également s'intéresser à la rupture des grains, en utilisant des sous-grains cohésifs.

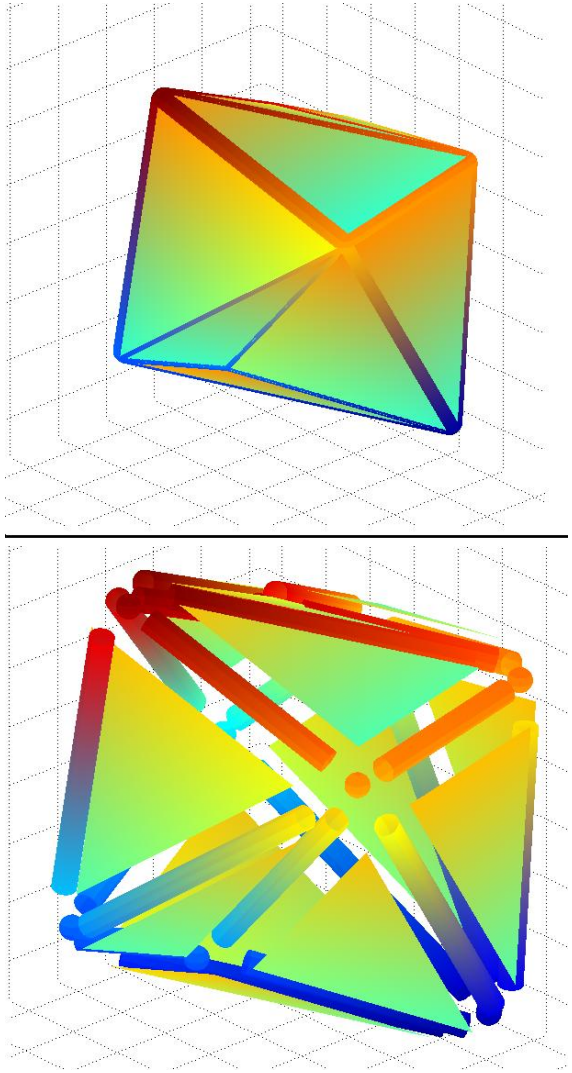




Modélisation par polygones ou polyèdres

-Polyèdres
-Applications tribologiques et géomécaniques
-Sphéropolyèdres

Les approches « cluster » et « polyèdre » peuvent être combinées dans un cadre qui se nourrit des avantages des deux méthodes : les sphéropolyèdres.



Il s'agit en fait de polyèdres dont on a :

-remplacé les coins par des petites sphères

-remplacé les arêtes par des cylindres de petits diamètres

-décalé les faces pour conserver la bonne relation de tangence avec les coins et les arêtes.

Modélisation par polygones ou polyèdres

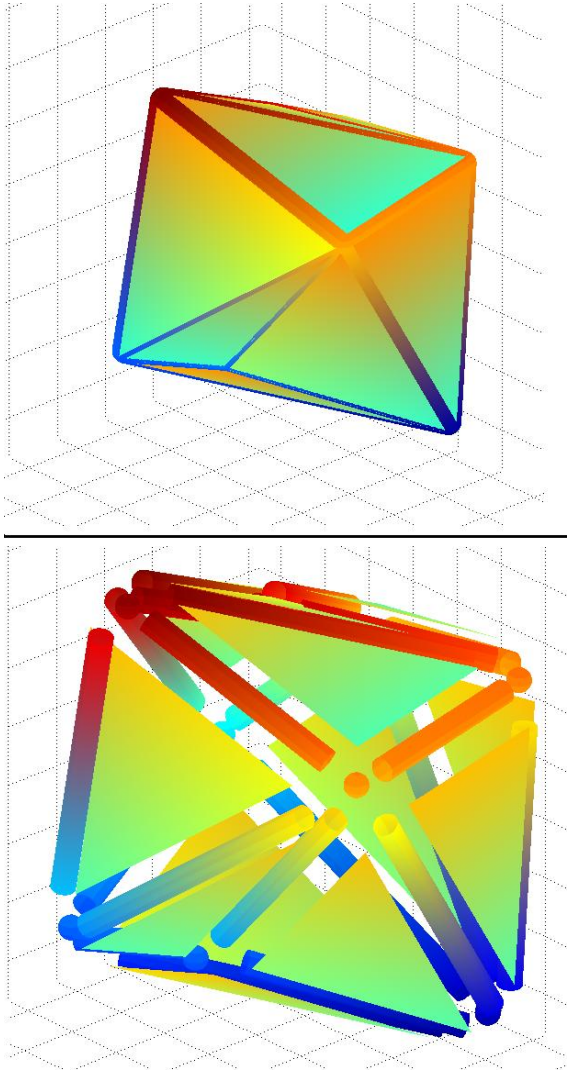
-Polyèdres
-Applications tribologiques et géomécaniques
-Sphéropolyèdres

Il s'agit donc d'arrondir les angles, et de s'assurer que tous les contacts peuvent se ranger dans la catégorie suivante :

-sphère / sphère
-sphère / cylindre
-sphère / plan
-cylindre / cylindre

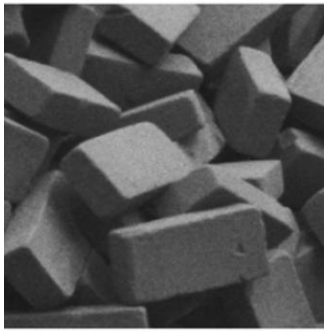
Toutes les situations ainsi décrites permettent de déterminer aisément une direction normale au contact et une distance d'interpénétration, de façon univoque.

Cette méthode est toutefois limitée aux cas des particules « à facettes », et reste moins efficace que les clusters dans le cas général.



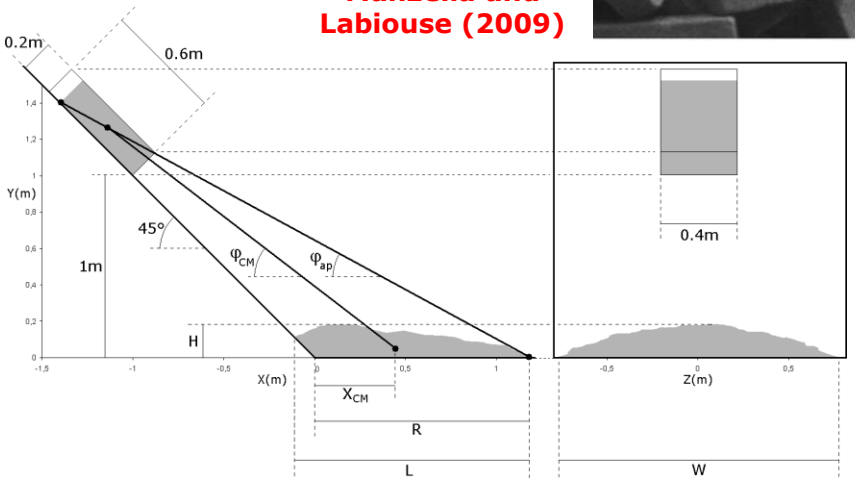
Modélisation par polygones ou polyèdres

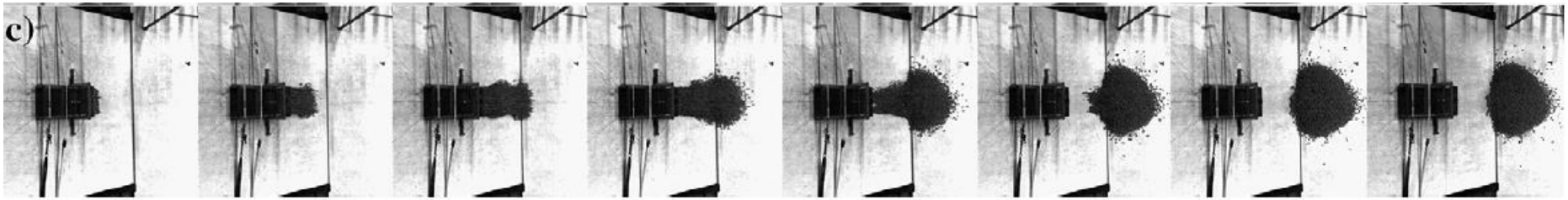
-Polyèdres
-Applications tribologiques et géomécaniques
-Sphéropolyèdres
-Applications en géophysique



Lors d'une étude récente, on a souhaité savoir si la modélisation discrète était capable de reproduire des résultats expérimentaux d'avalanches rocheuses reproduites en laboratoire.

Manzella and Labiouse (2009)

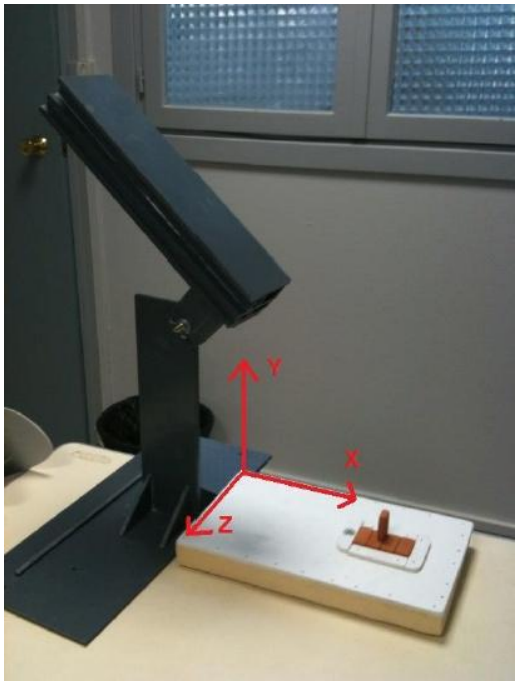




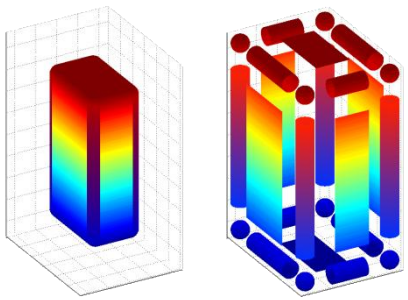
Modélisation par polygones ou polyèdres

-Polyèdres
-Applications tribologiques et géomécaniques
-Sphéropolyèdres
-Applications en géophysique

-> Réalisation d'essais d'impact individuels, filmés par deux caméras rapides.

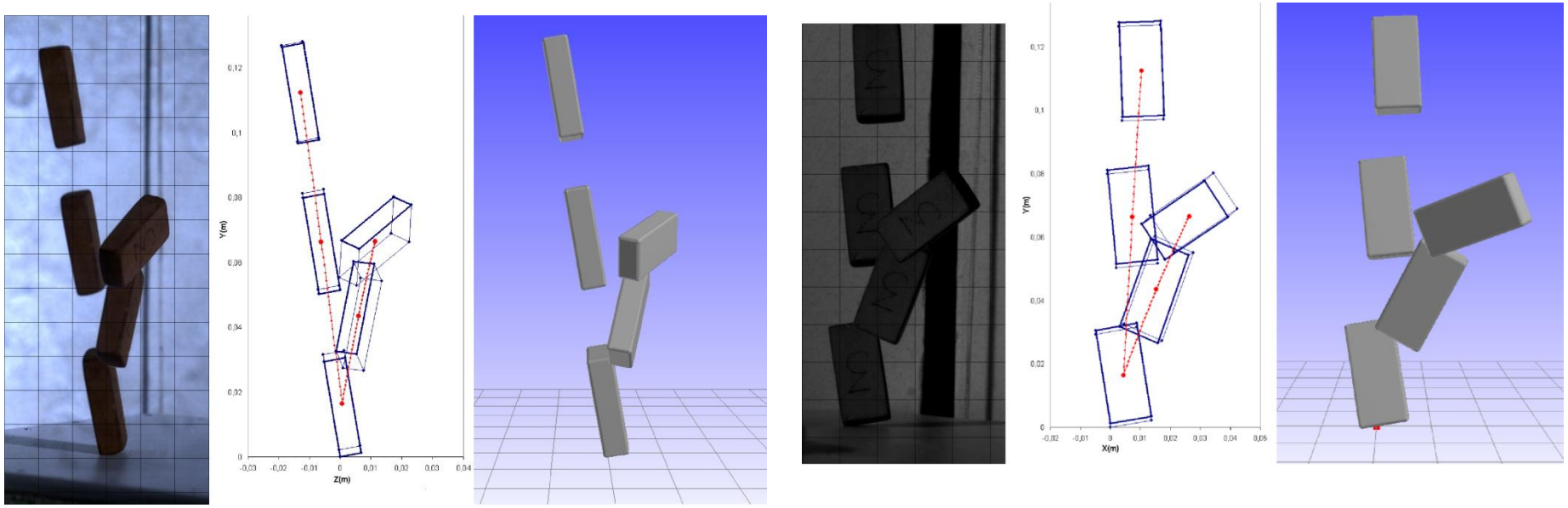


Modélisation par polygones ou polyèdres



-Polyèdres
-Applications tribologiques et géomécaniques
-Sphéropolyèdres
-Applications en géophysique

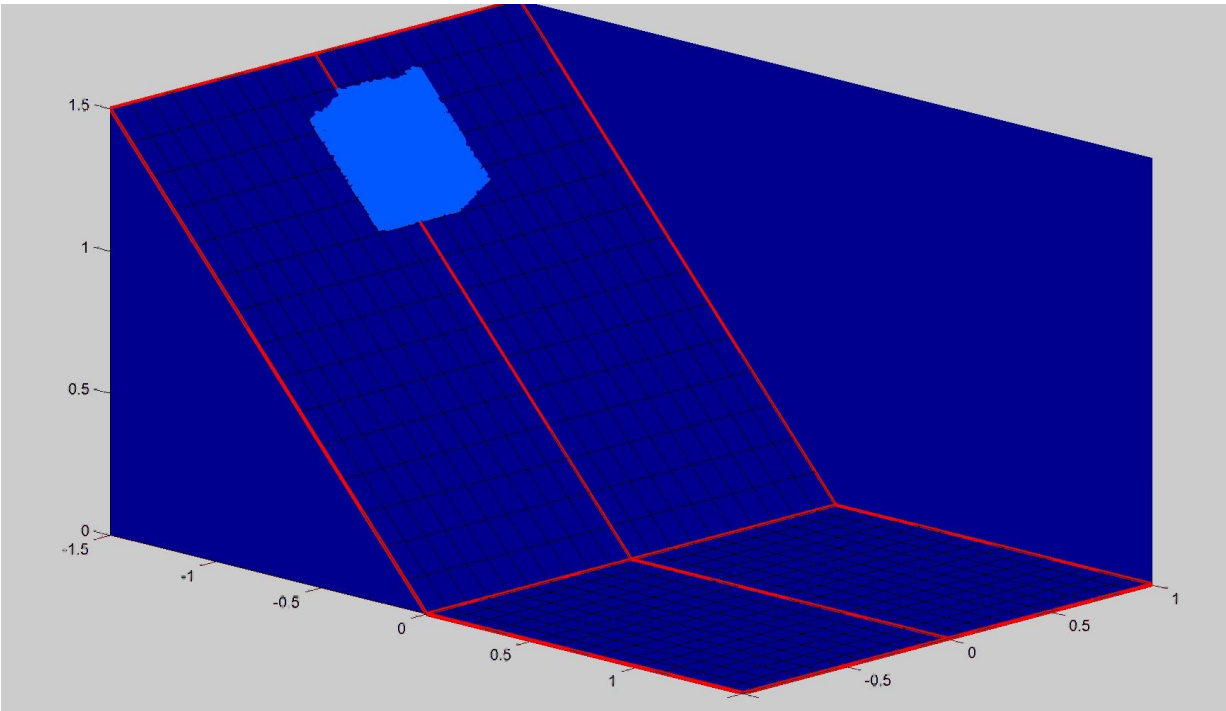
-> Calibration des lois de contact sur les cinématiques de rebonds, avec une modélisation des briques par sphéropolyèdres.



Modélisation par polygones ou polyèdres

-Polyèdres
-Applications tribologiques et géomécaniques
-Sphéropolyèdres
-Applications en géophysique

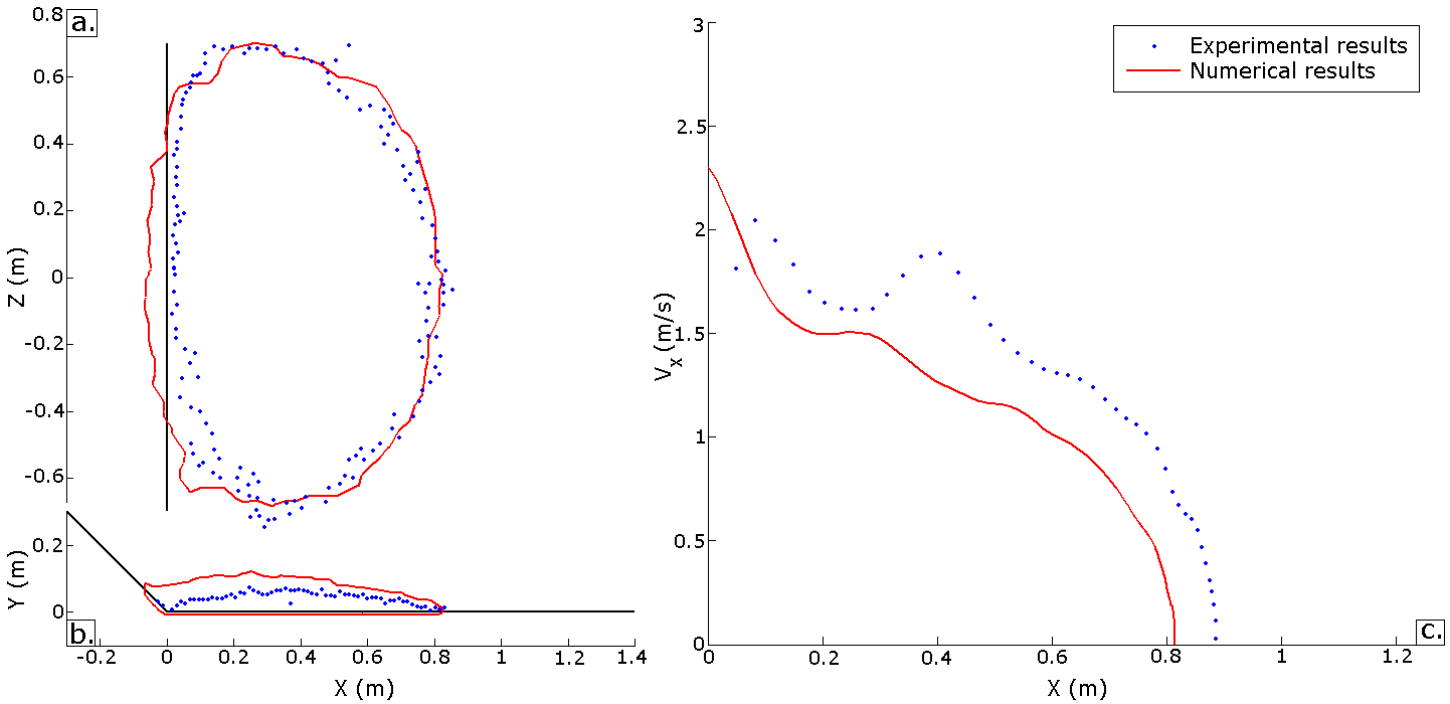
-> Introduction de ces paramètres de contact dans une simulation de l'évènement complet.



Modélisation par polygones ou polyèdres

-Polyèdres
-Applications tribologiques et géomécaniques
-Sphéropolyèdres
-Applications en géophysique

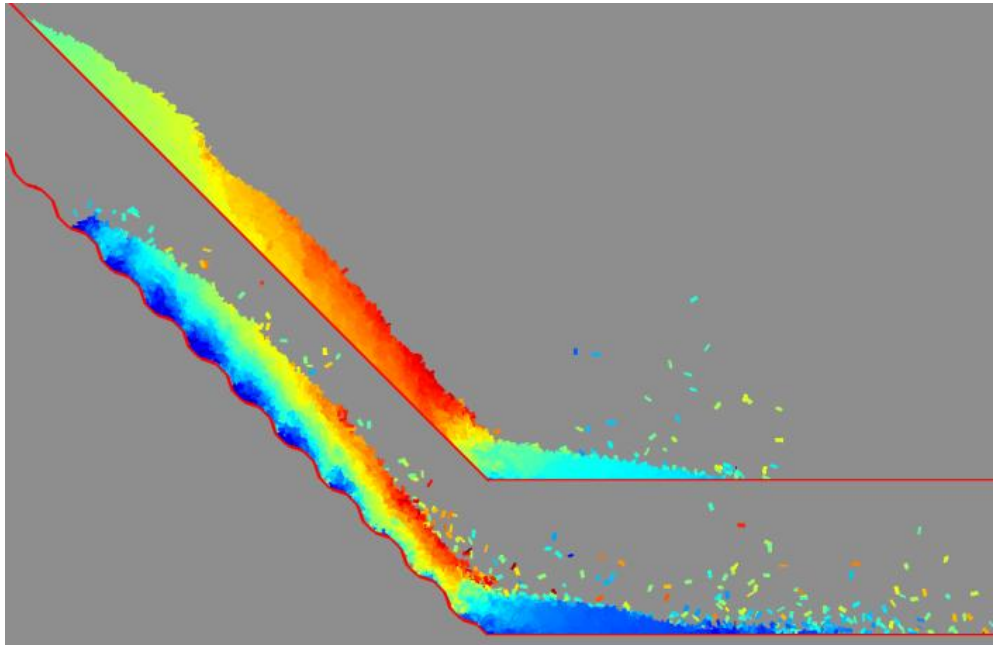
-> Validation du modèle par comparaison avec les résultats expérimentaux.

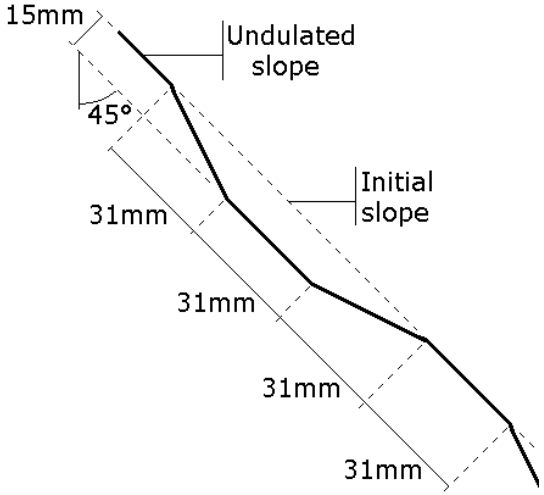


Modélisation par polygones ou polyèdres

-Polyèdres
-Applications tribologiques et géomécaniques
-Sphéropolyèdres
-Applications en géophysique

-> Etude paramétrique sur pentes lisses et rugueuses.

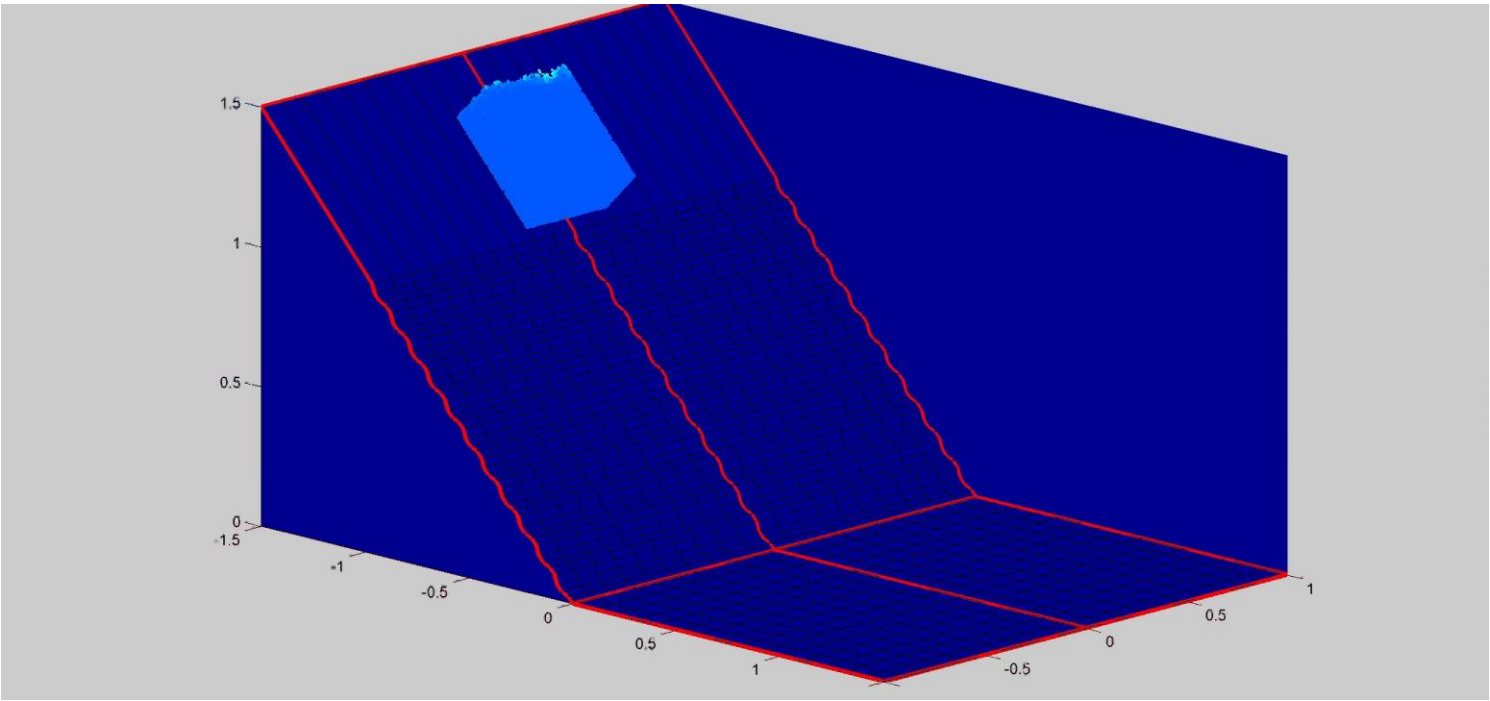




Modélisation par polygones ou polyèdres

-Polyèdres
-Applications tribologiques et géomécaniques
-Sphéropolyèdres
-Applications en géophysique

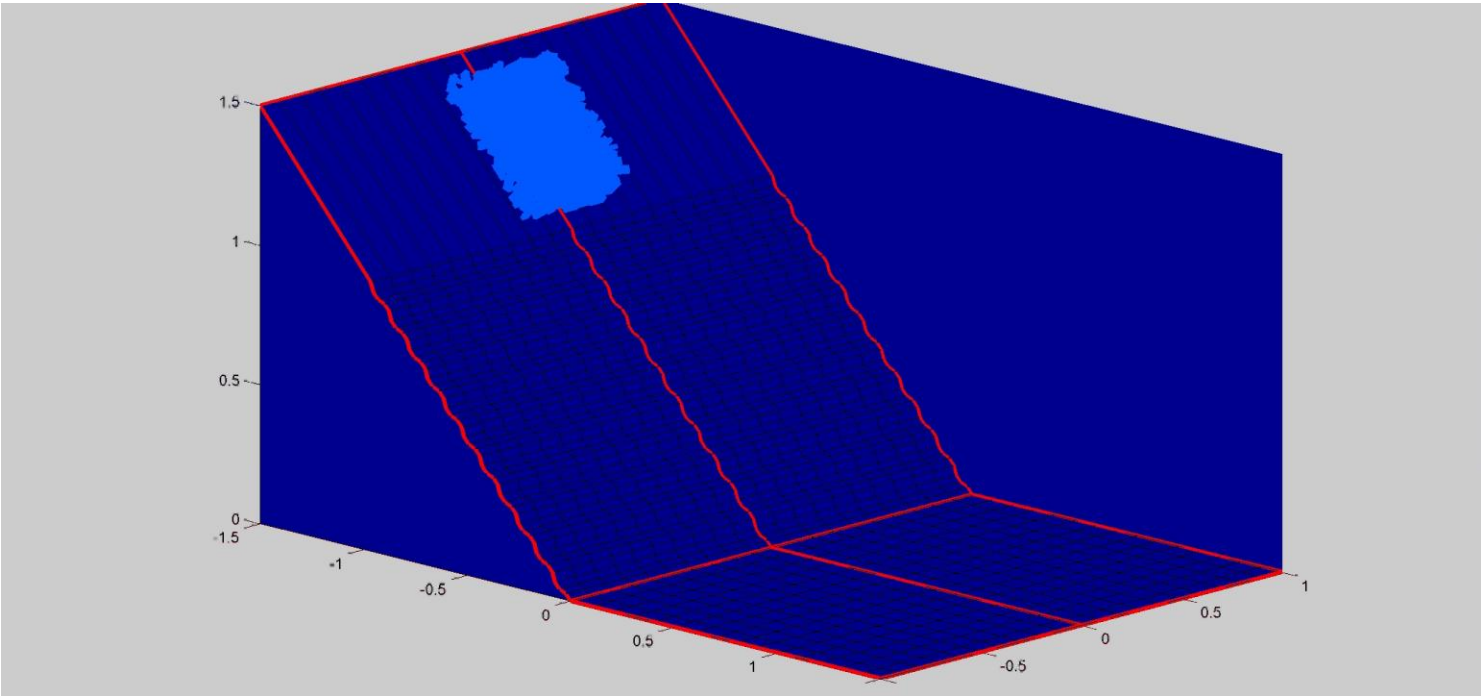
-> Mise en évidence de comportements caractéristiques : écoulements cisaillés.



Modélisation par polygones ou polyèdres

-Polyèdres
-Applications tribologiques et géomécaniques
-Sphéropolyèdres
-Applications en géophysique

-> Mise en évidence de comportements caractéristiques : écoulements collisionnels.



Modélisation par polygones ou polyèdres

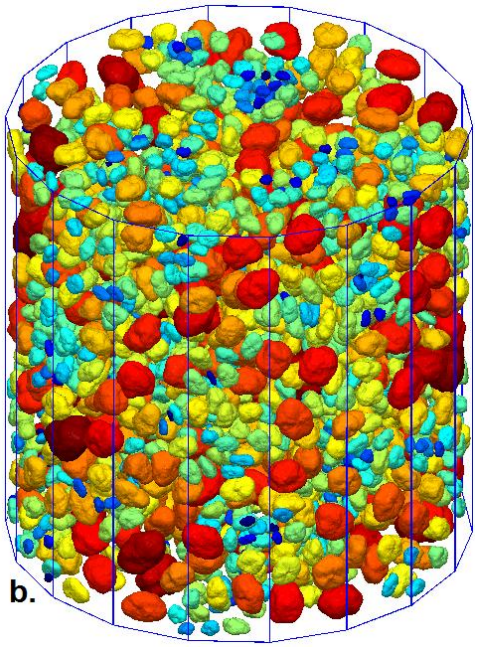
-Polyèdres
-Applications tribologiques et géomécaniques
-Sphéropolyèdres
-Applications en géophysique

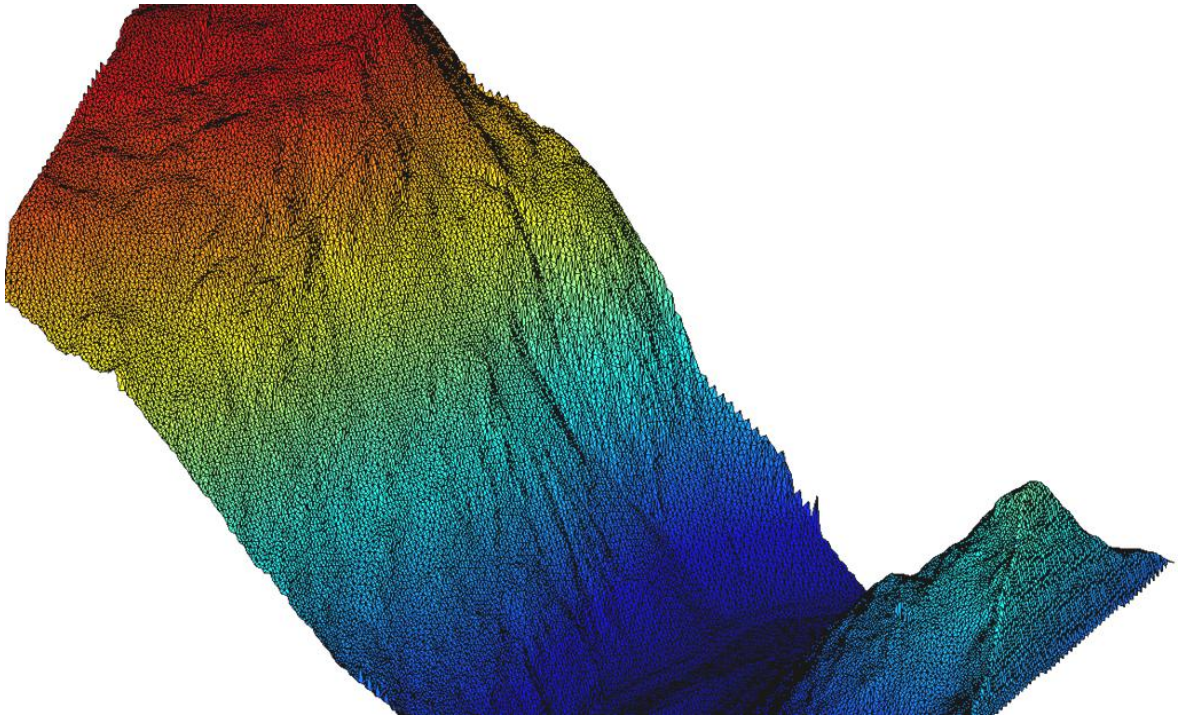
-> Prochaines étapes : blocs réalistes sur pentes réalistes.

Modélisation par polygones ou polyèdres

-Polyèdres
-Applications tribologiques et géomécaniques
-Sphéropolyèdres
-Applications en géophysique

-> Prochaines étapes : blocs réalistes sur pentes réalistes.





Merci de votre attention

Guilhem MOLLON

4GMD 2014-2015