

# **Découpage virtuel interactif de corps élastiques pour simulation chirurgicale**

présenté par  
Vincent Magnoux

Polytechnique Montréal  
26 août 2020

# Contexte

- **Simulation chirurgicale**
  - Entraînement
- **Créer environnement virtuel**
  - Interaction
  - Réalisme
- **Simule des organes mous**
- **Découpage**

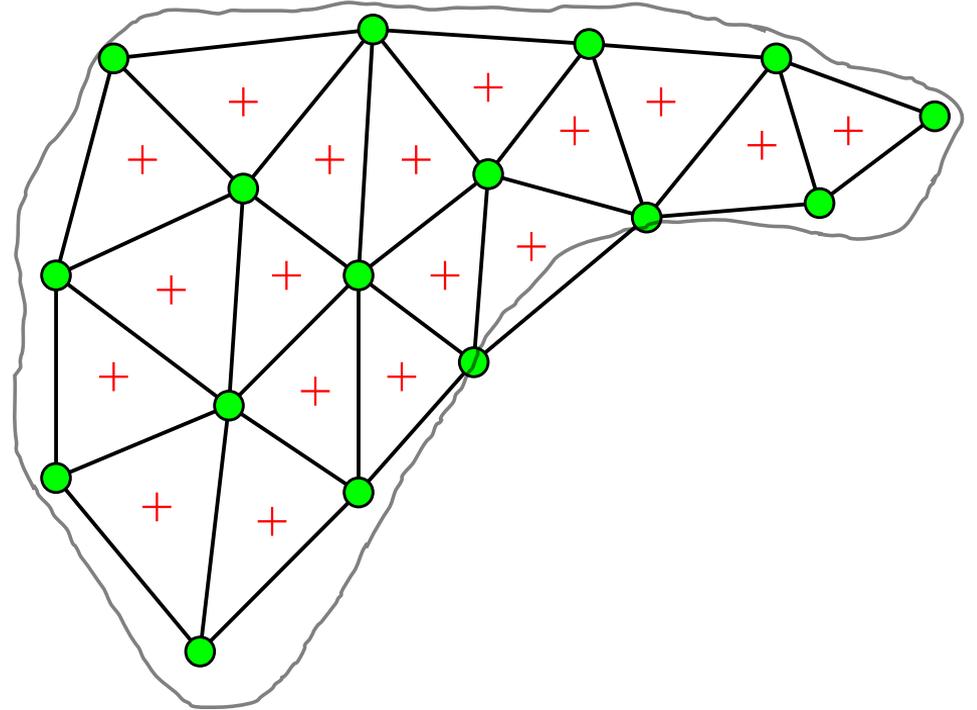


# Plan

- **Méthodes existantes**
- **Volet 1 : description d'un objet et découpage statique**
- **Volet 2 : découpage interactif et dynamique**
- **Volet 3 : accélération GPU**
- **Améliorations futures**

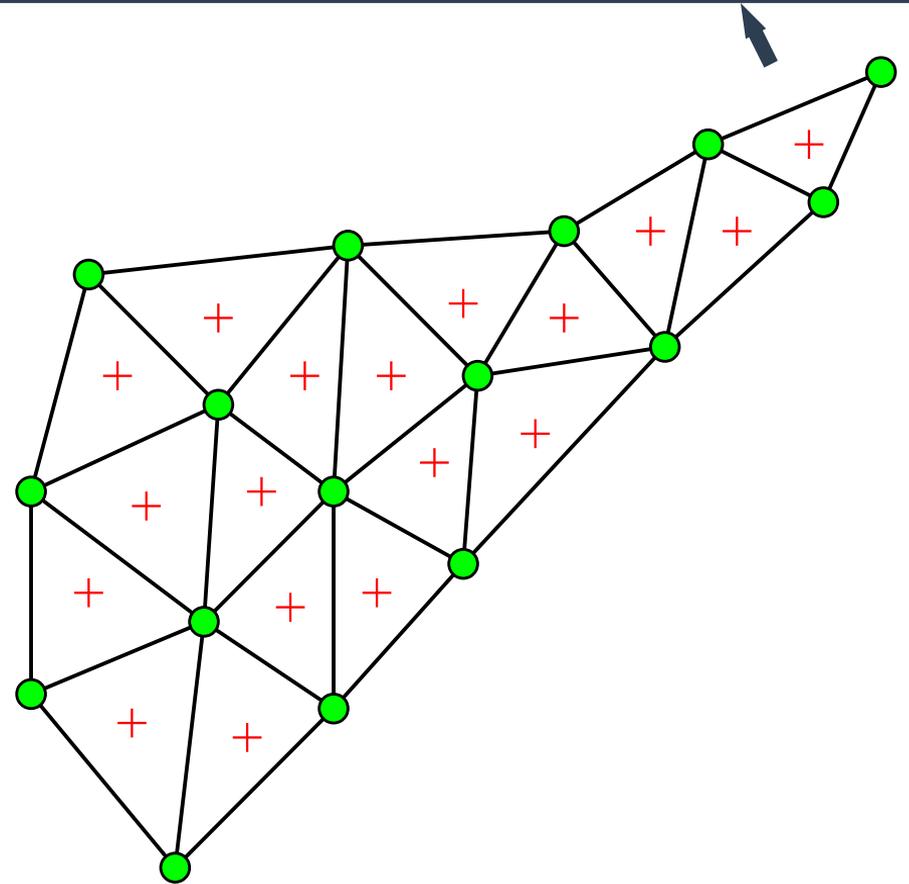
# Méthodes existantes - éléments finis (FEM)

- **Objet divisé en éléments**
  - Déplacement des sommets
- **Remaillage après découpage**



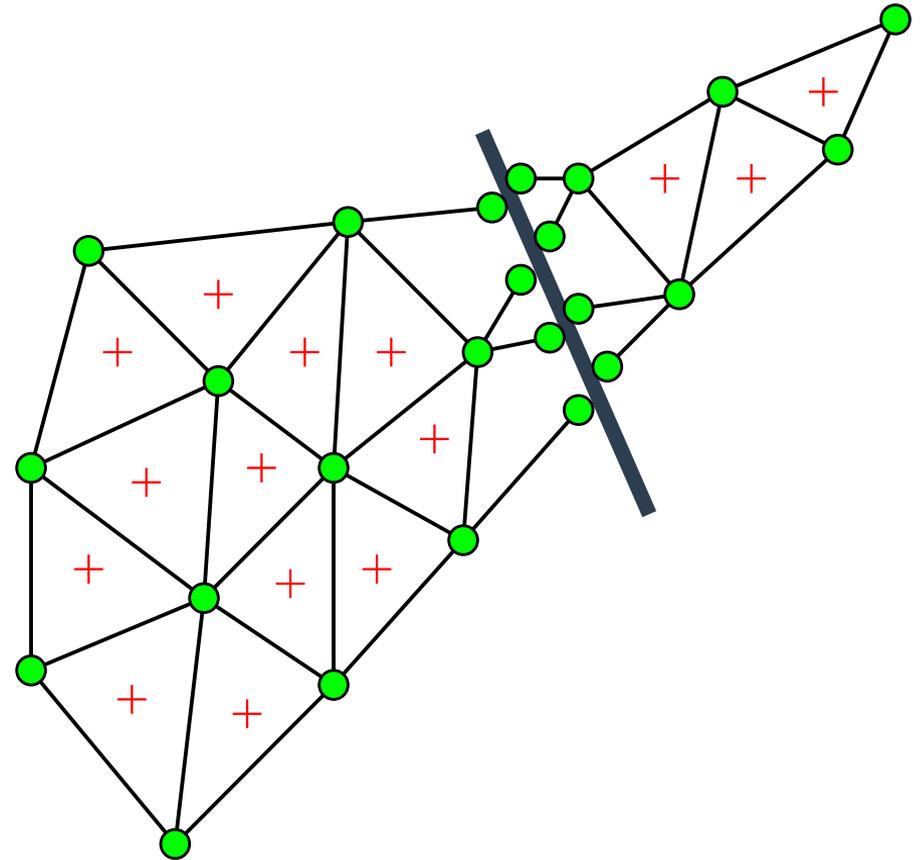
# Méthodes existantes - éléments finis (FEM)

- **Objet divisé en éléments**
  - Déplacement des sommets
- **Remaillage après découpage**



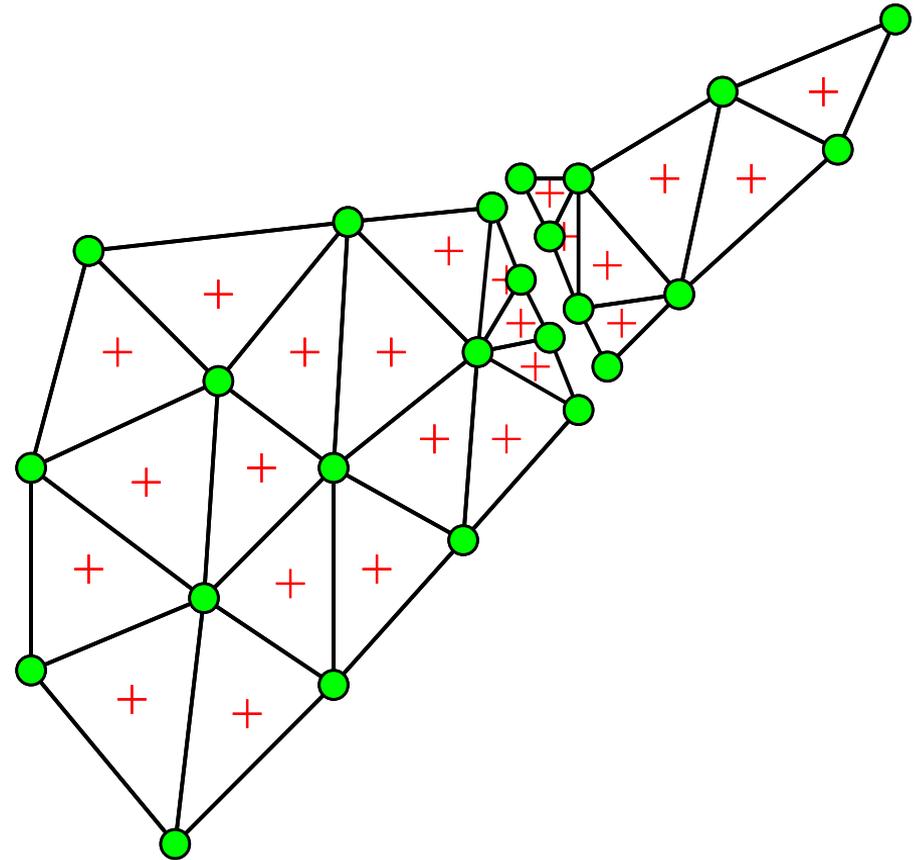
# Méthodes existantes - éléments finis (FEM)

- **Objet divisé en éléments**
  - Déplacement des sommets
- **Remaillage après découpage**



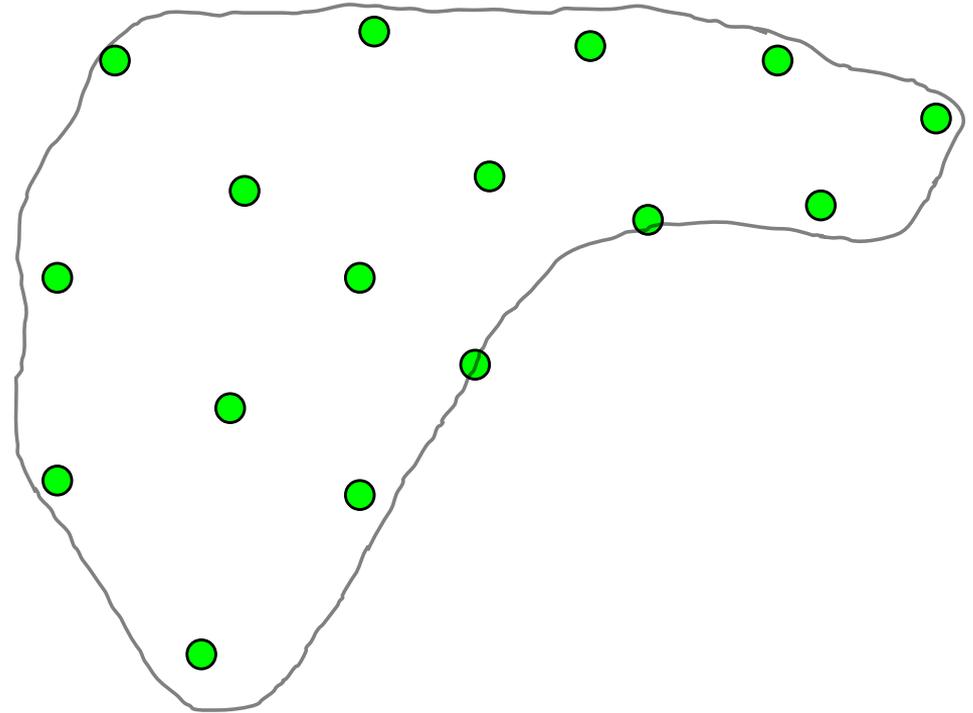
# Méthodes existantes - éléments finis (FEM)

- **Objet divisé en éléments**
  - Déplacement des sommets
- **Remaillage après découpage**



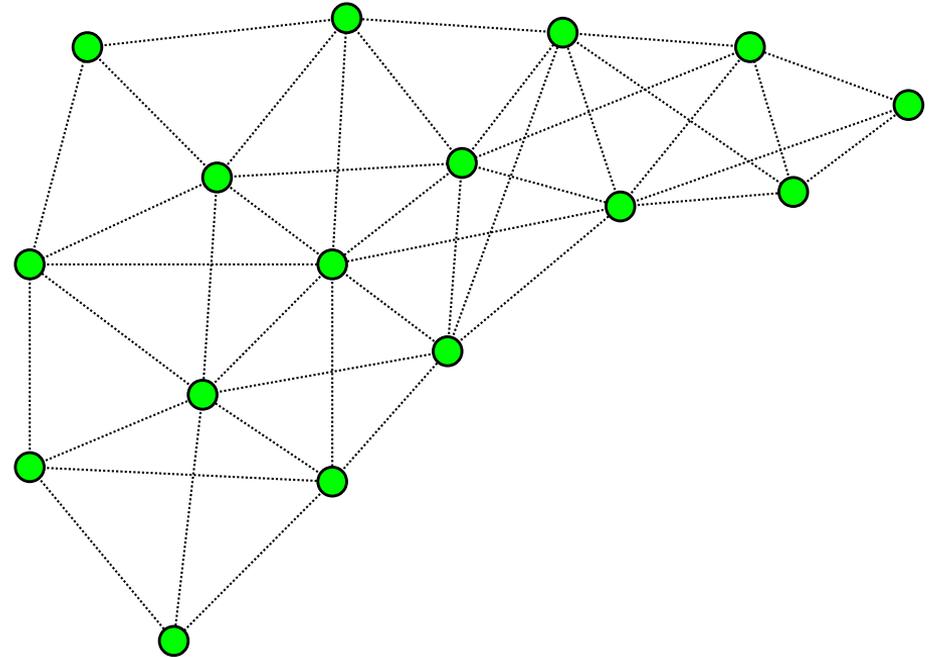
# Méthodes existantes - particules

- **Objet représenté par un nuage de particules**
  - Déplacement des particules
  - Liens déterminés par la proximité
- **Ajout de particules après découpage**



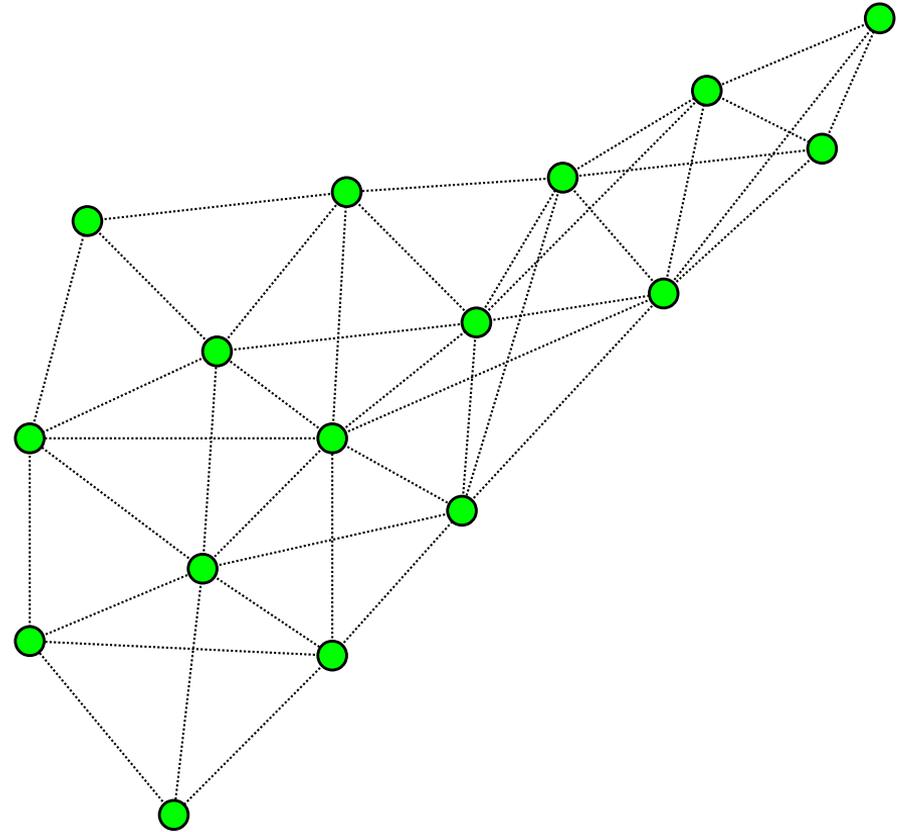
# Méthodes existantes - particules

- **Objet représenté par un nuage de particules**
  - Déplacement des particules
  - Liens déterminés par la proximité
- **Ajout de particules après découpage**



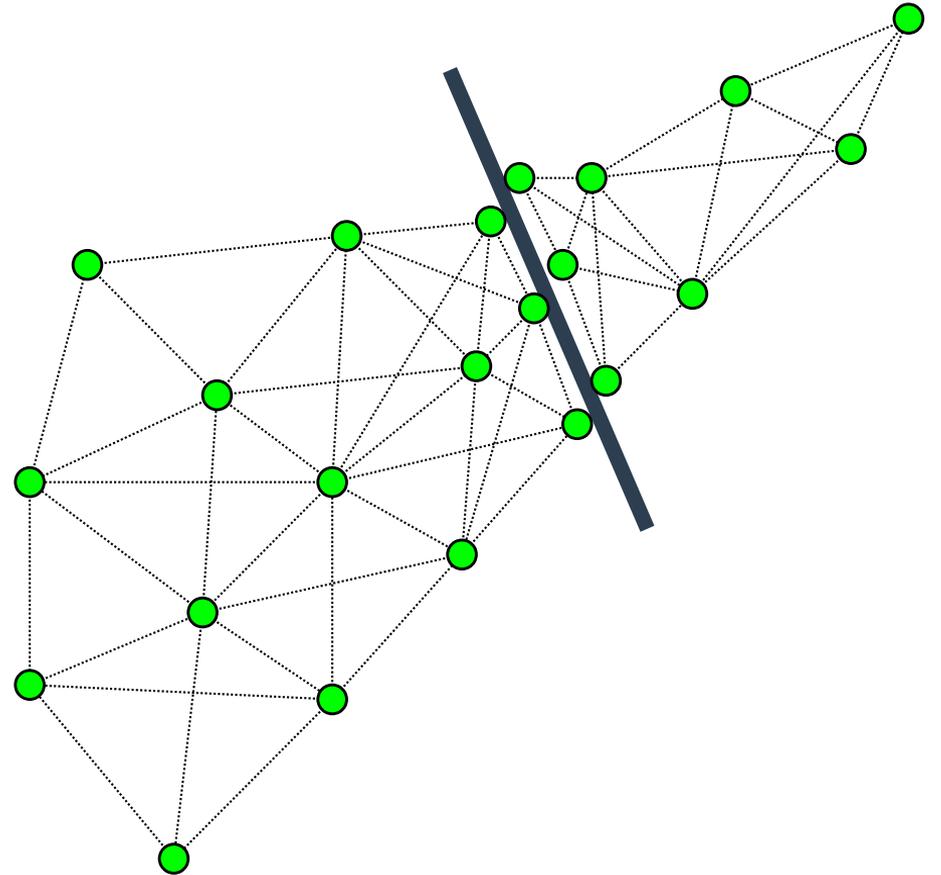
# Méthodes existantes - particules

- **Objet représenté par un nuage de particules**
  - Déplacement des particules
  - Liens déterminés par la proximité
- **Ajout de particules après découpage**



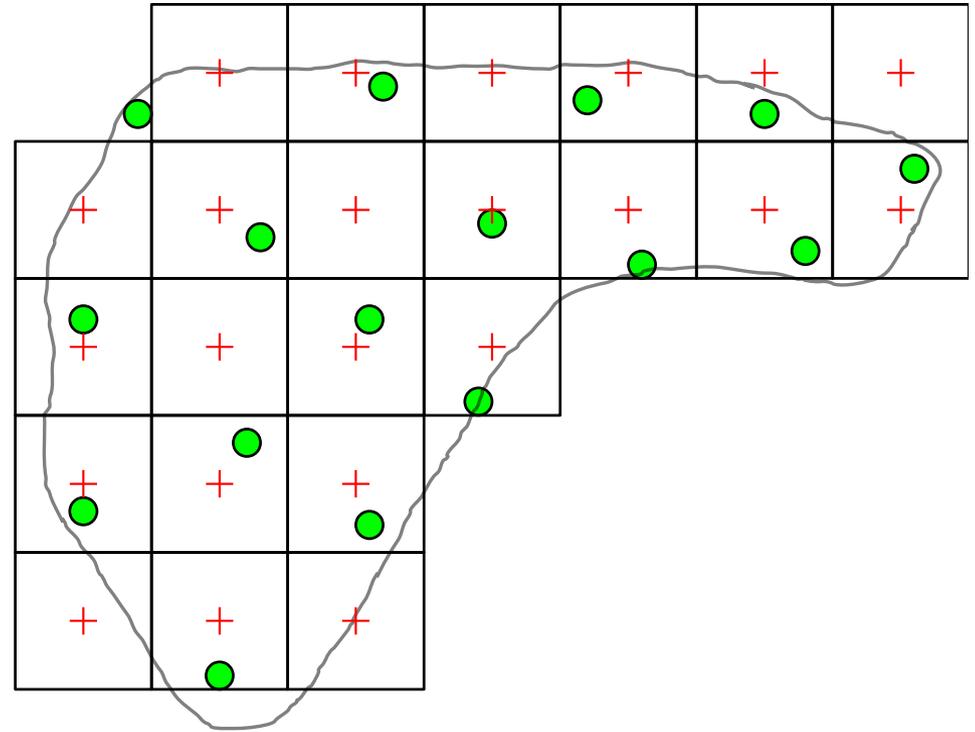
# Méthodes existantes - particules

- **Objet représenté par un nuage de particules**
  - Déplacement des particules
  - Liens déterminés par la proximité
- **Ajout de particules après découpage**



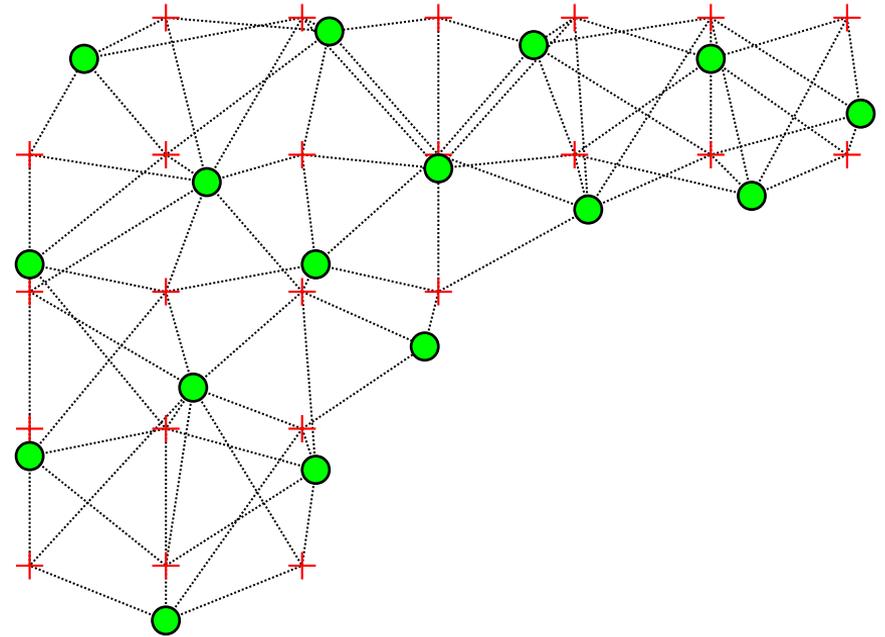
# Méthodes existantes - hybride

- Par exemple : méthode **Element-free Galerkin (EFG)**
- **Objet représenté par un nuage de particules**
- **Calculs faits sur une grille régulière d'éléments**
- **Liens déterminés par proximité**
- **Ajouts de particules et d'éléments après découpage**



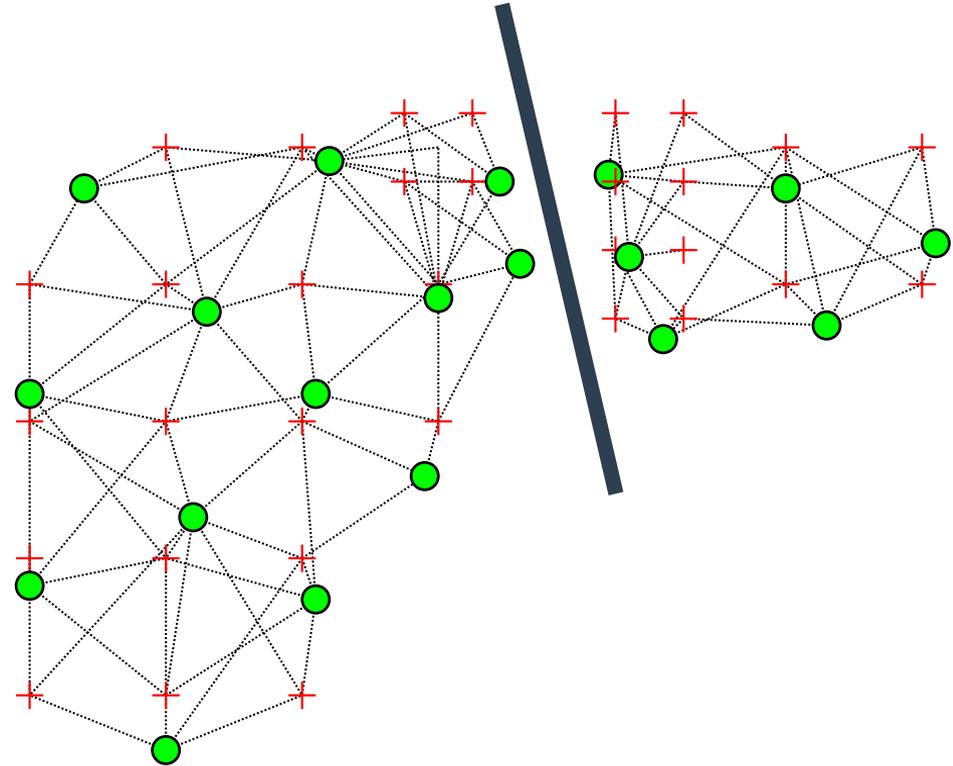
# Méthodes existantes - hybride

- Par exemple : méthode Element-free Galerkin (EFG)
- Objet représenté par un nuage de particules
- Calculs faits sur une grille régulière d'éléments
- Liens déterminés par proximité
- Ajouts de particules et d'éléments après découpage



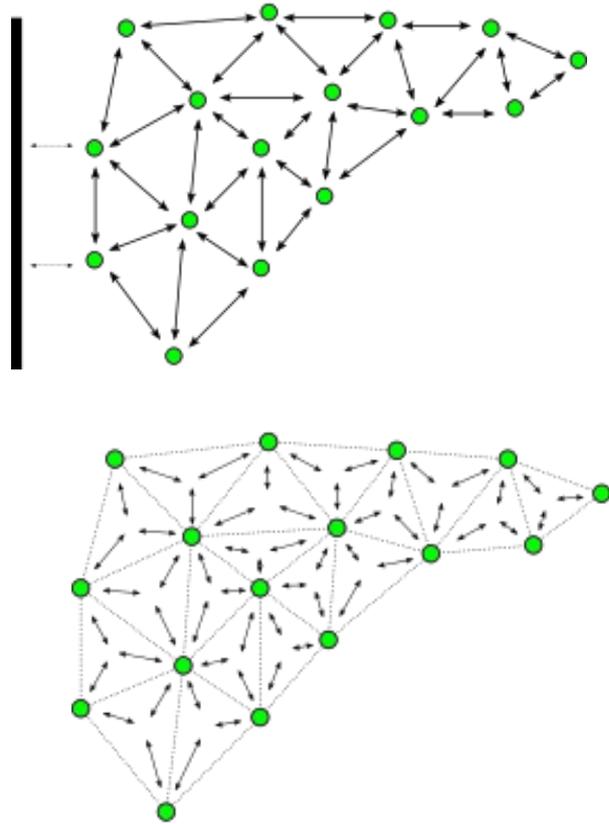
# Méthodes existantes - hybride

- Par exemple : méthode Element-free Galerkin (EFG)
- Objet représenté par un nuage de particules
- Calculs faits sur une grille régulière d'éléments
- Liens déterminés par proximité
- Ajouts de particules et d'éléments après découpage



# Méthode existantes - PBD

- **Mécanique basée sur la position**
  - Prédiction-correction
- **Système de contraintes**
  - Distance
  - Énergie
- **Découpage**
  - Comme FEM
  - Comme particules



# Objectifs

- **Forces élastiques précises**
- **Découpage rapide et précis**
- **Stabilité**
- **Temps réel**
- **Haute résolution**
- **Rendu visuel**
- **Interactions**
- **Mécanique des milieux continus**
- **Méthode avec particules**
- **Méthode EFG**
- **GPU**
- **GPU**
- **Surface explicite**
- **Surface explicite**

# Méthodologie

# Description d'un objet

- **Éléments (grille d'intégration)**

- Volume / géométrie
- Déformation
- Contraintes

- **Particules**

- Forces
- Déplacements
- Masses

- **Connectivité**

- Relations topologiques
- Structure de calcul

- **Surface**

- Contacts
- Affichage



# Description d'un objet

- **Éléments (grille d'intégration)**

- Volume / géométrie
- Déformation
- Contraintes

- **Particules**

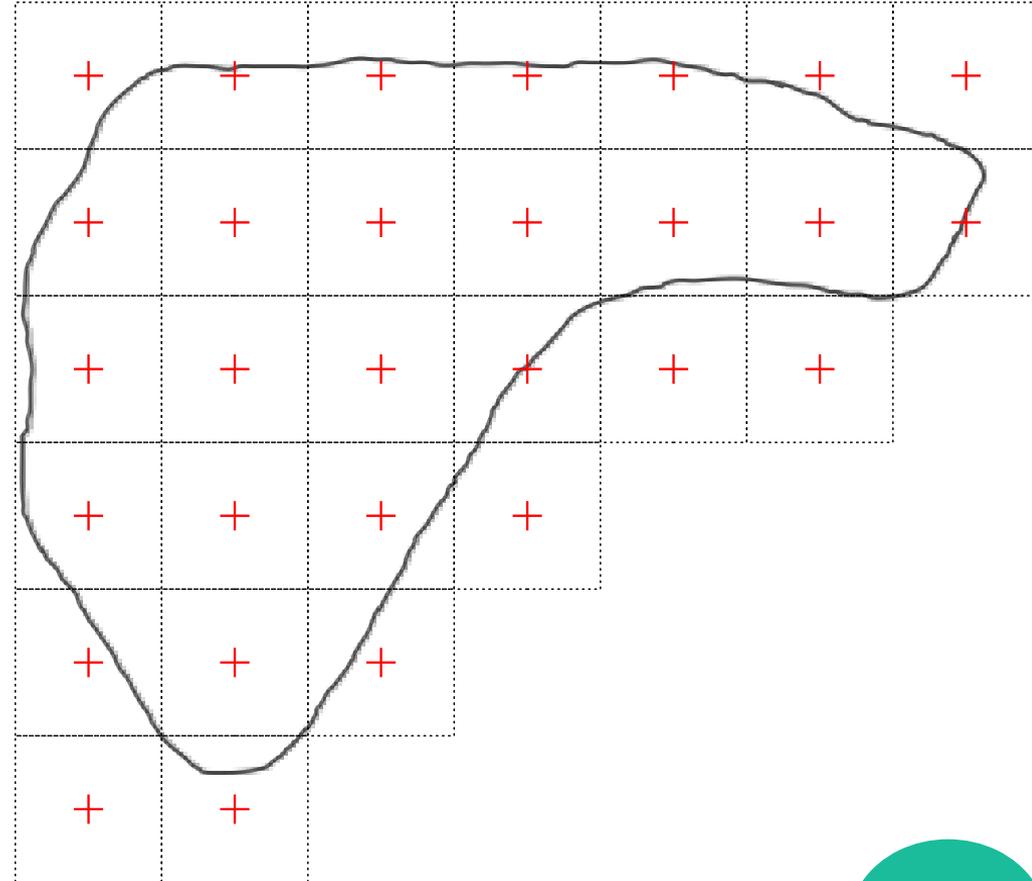
- Forces
- Déplacements
- Masses

- **Connectivité**

- Relations topologiques
- Structure de calcul

- **Surface**

- Contacts
- Affichage



# Description d'un objet

- **Éléments (grille d'intégration)**

- Volume / géométrie
- Déformation
- Contraintes

- **Particules**

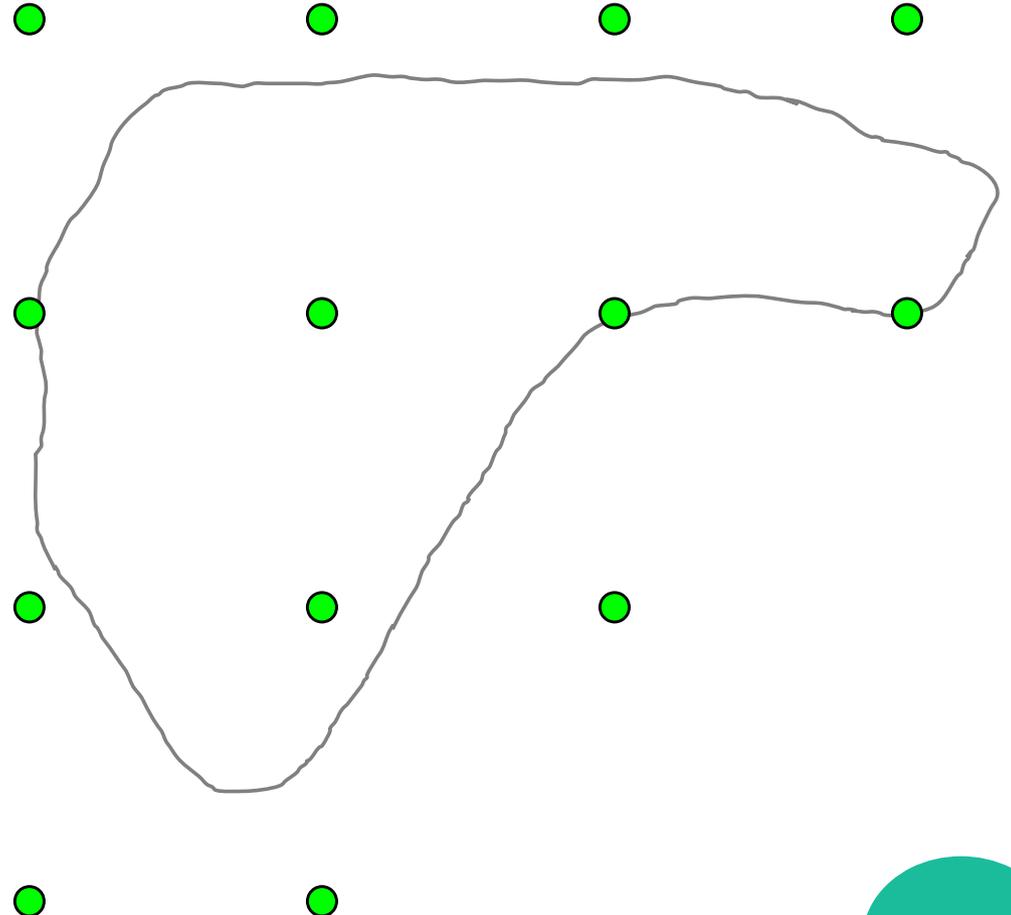
- Forces
- Déplacements
- Masses

- **Connectivité**

- Relations topologiques
- Structure de calcul

- **Surface**

- Contacts
- Affichage



# Description d'un objet

- **Éléments (grille d'intégration)**

- Volume / géométrie
- Déformation
- Contraintes

- **Particules**

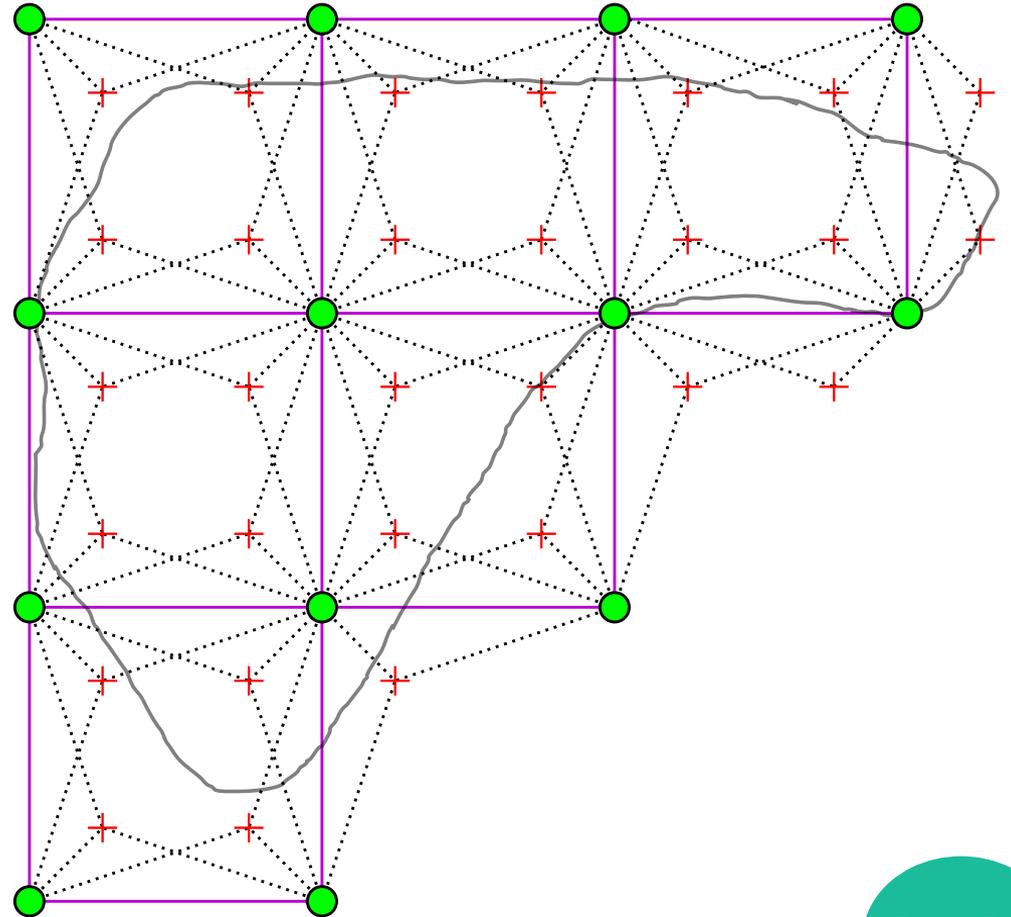
- Forces
- Déplacements
- Masses

- **Connectivité**

- Relations topologiques
- Structure de calcul

- **Surface**

- Contacts
- Affichage



# Description d'un objet

- **Éléments (grille d'intégration)**

- Volume / géométrie
- Déformation
- Contraintes

- **Particules**

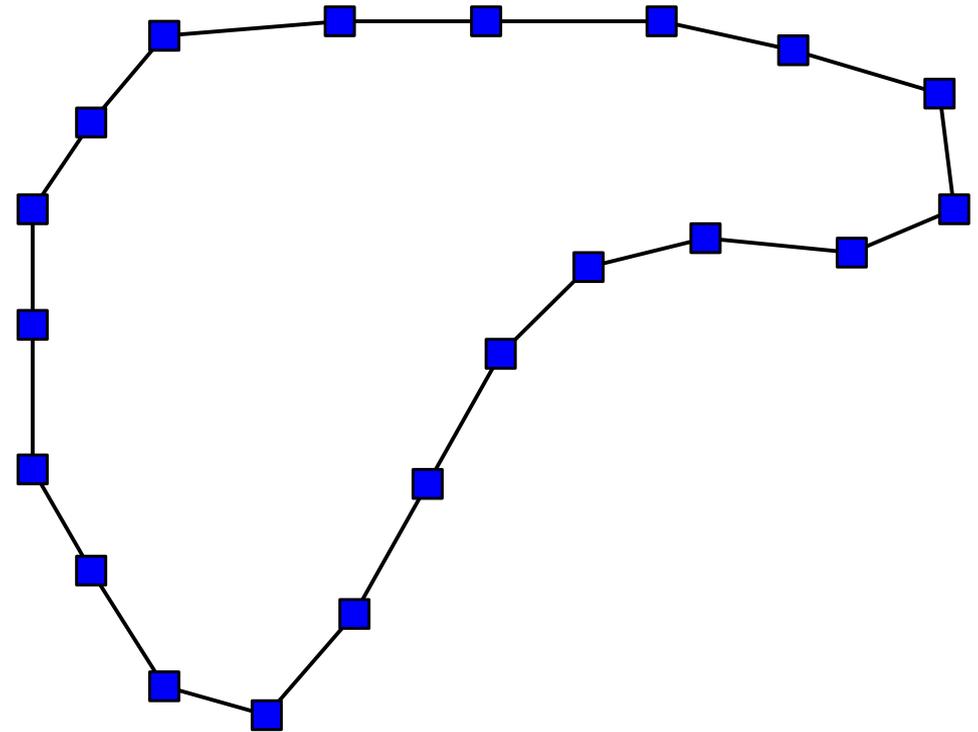
- Forces
- Déplacements
- Masses

- **Connectivité**

- Relations topologiques
- Structure de calcul

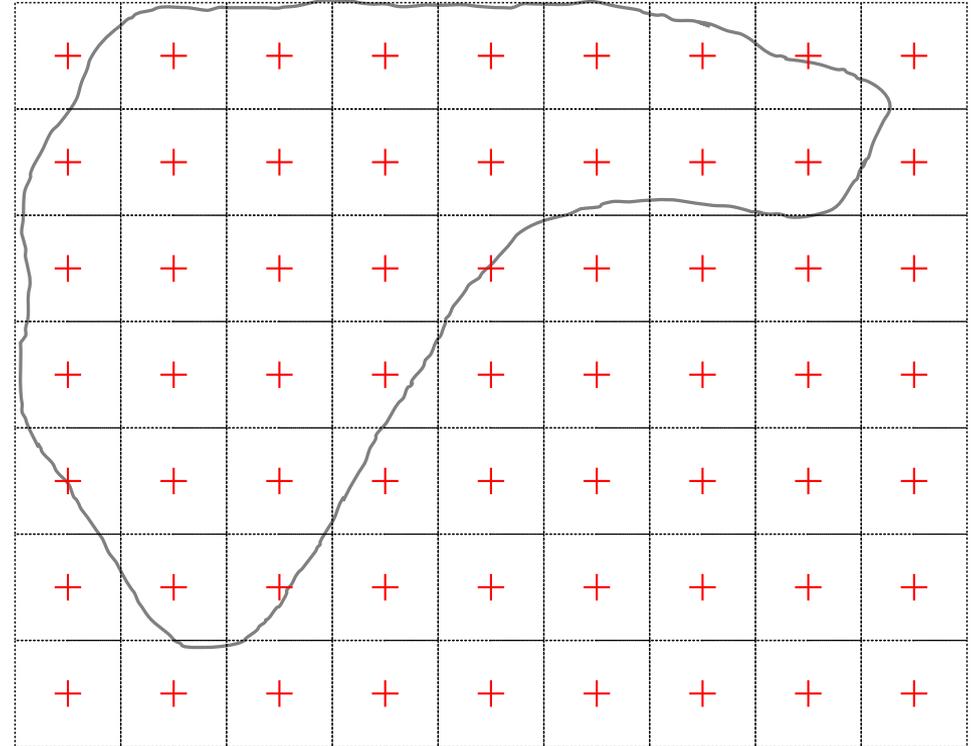
- **Surface**

- Contacts
- Affichage



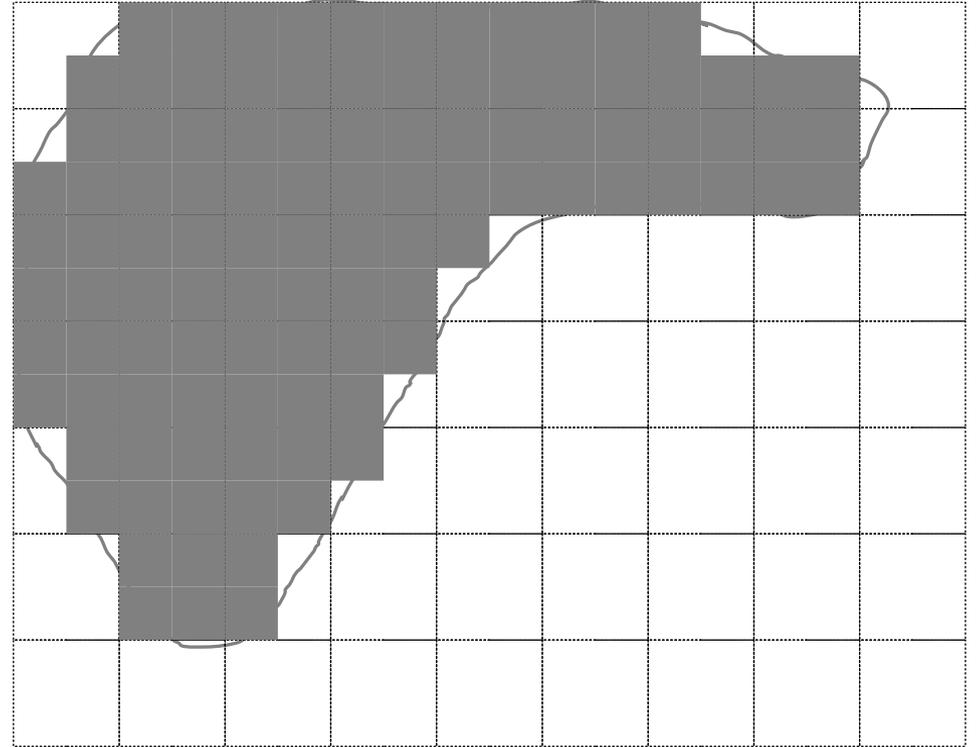
# Calcul du volume

- **Ajuster les éléments à la forme de l'objet**
- **Échantillonnage**
  - Compter le nombre de points à l'intérieur
  - Calculer le volume
- **Sert à une intégration plus précise**



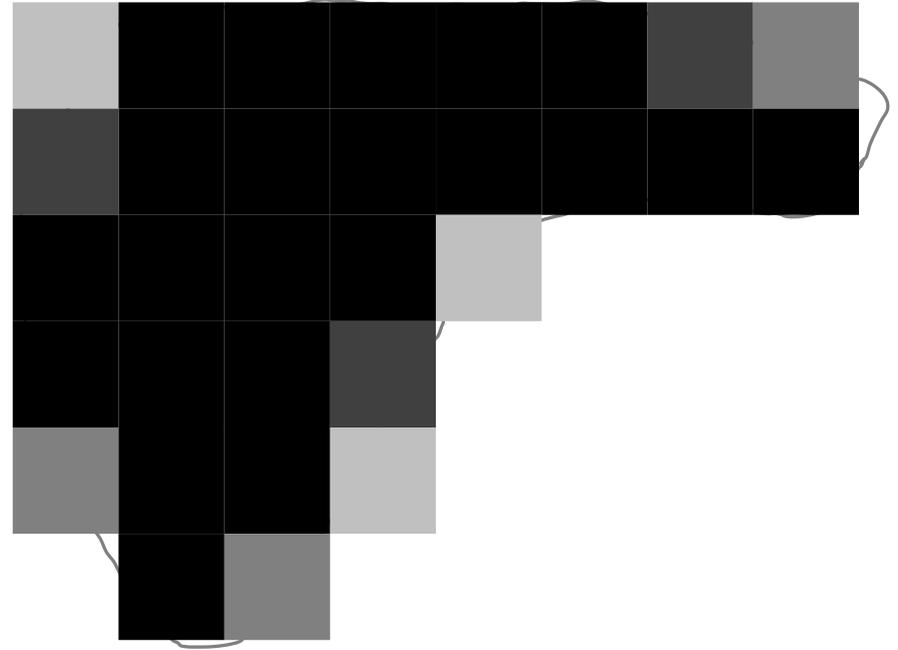
# Calcul du volume

- **Ajuster les éléments à la forme de l'objet**
- **Échantillonnage**
  - Compter le nombre de points à l'intérieur
  - Calculer le volume
- **Sert à une intégration plus précise**



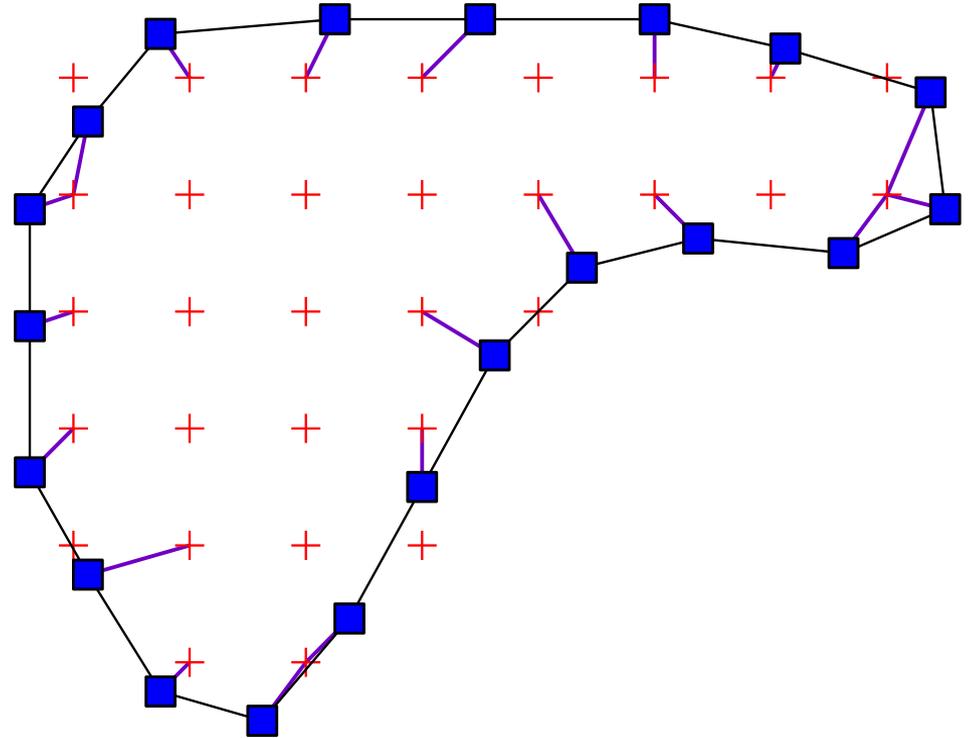
# Calcul du volume

- **Ajuster les éléments à la forme de l'objet**
- **Échantillonnage**
  - Compter le nombre de points à l'intérieur
  - Calculer le volume
- **Sert à une intégration plus précise**



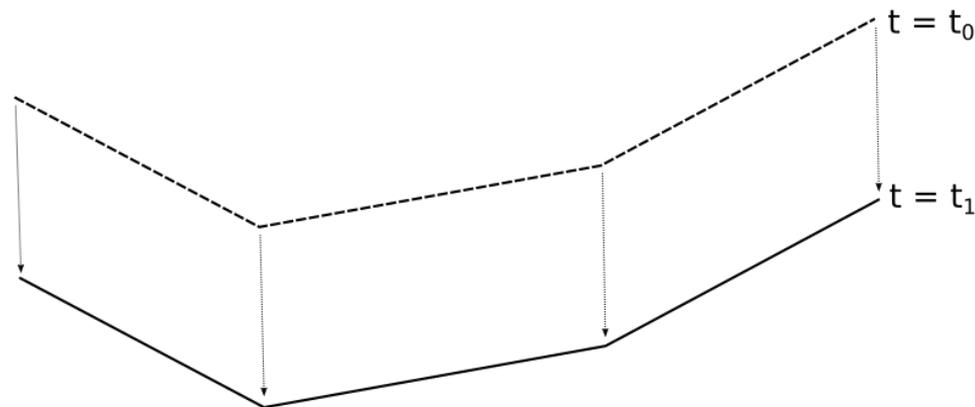
# Mappage de la surface

- **Sommets sur particules**
- **Proximité**
- **Topologie (discontinuités)**



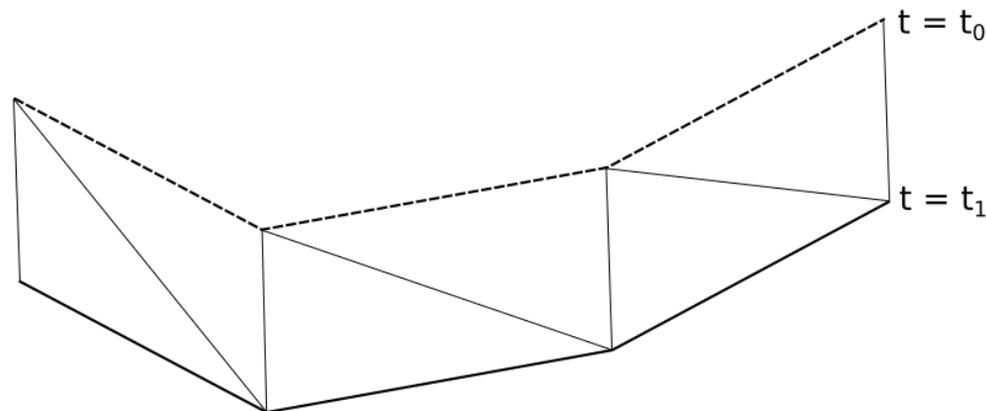
# Algorithmes de découpage

- **Découpage selon une surface de coupe**
  - Surface balayée
  - Plan
  - Surface triangulée
- **Les algorithmes font abstraction de la description de l'outil**



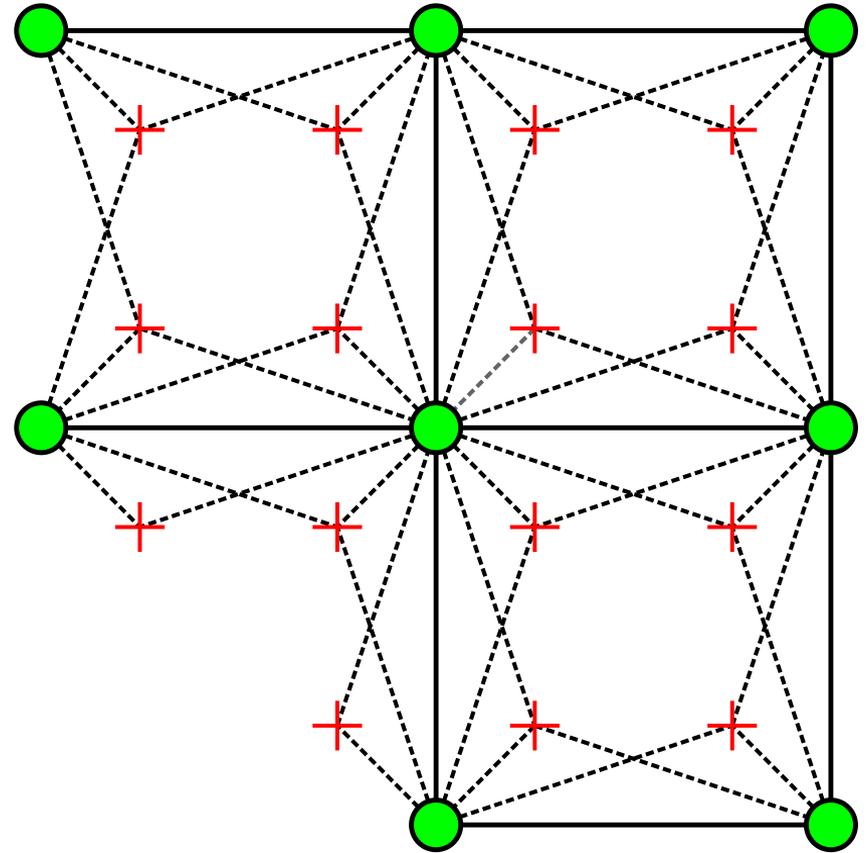
# Algorithmes de découpage

- **Découpage selon une surface de coupe**
  - Surface balayée
  - Plan
  - Surface triangulée
- **Les algorithmes font abstraction de la description de l'outil**



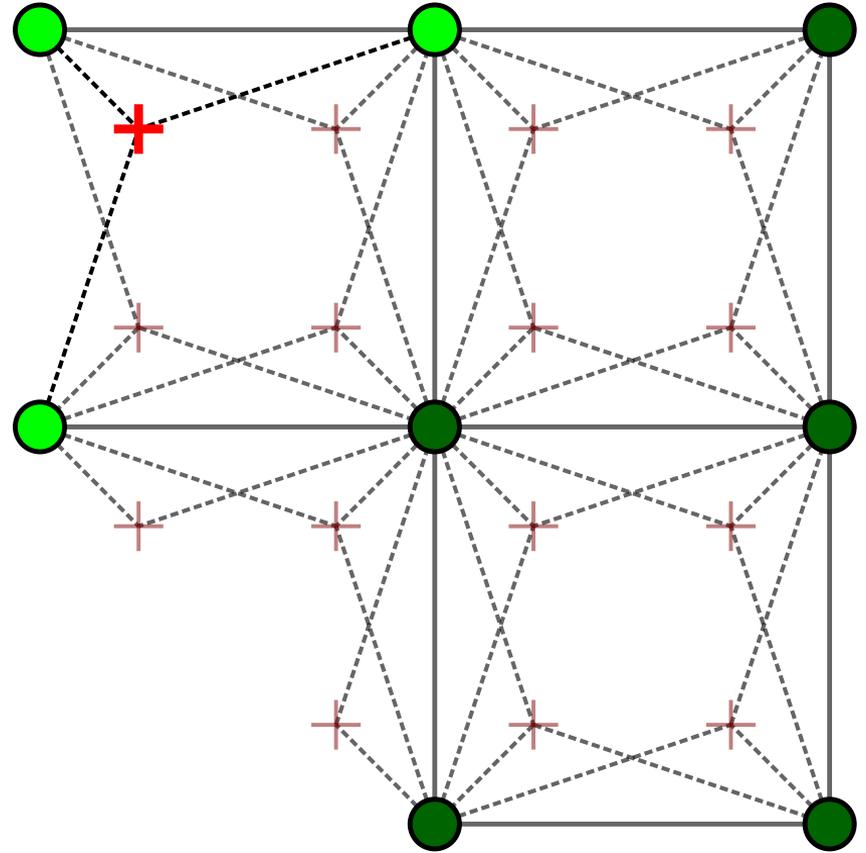
# Découpage - volume

- **Coupe les liens qui traversent la surface de coupe**
  - Particule-particule
  - Élément-particule
    - Primaire
    - Secondaire
- **Trouve des nouveaux voisins**
  - Non coplanaires
- **Aucun ajout d'éléments ou de particules**



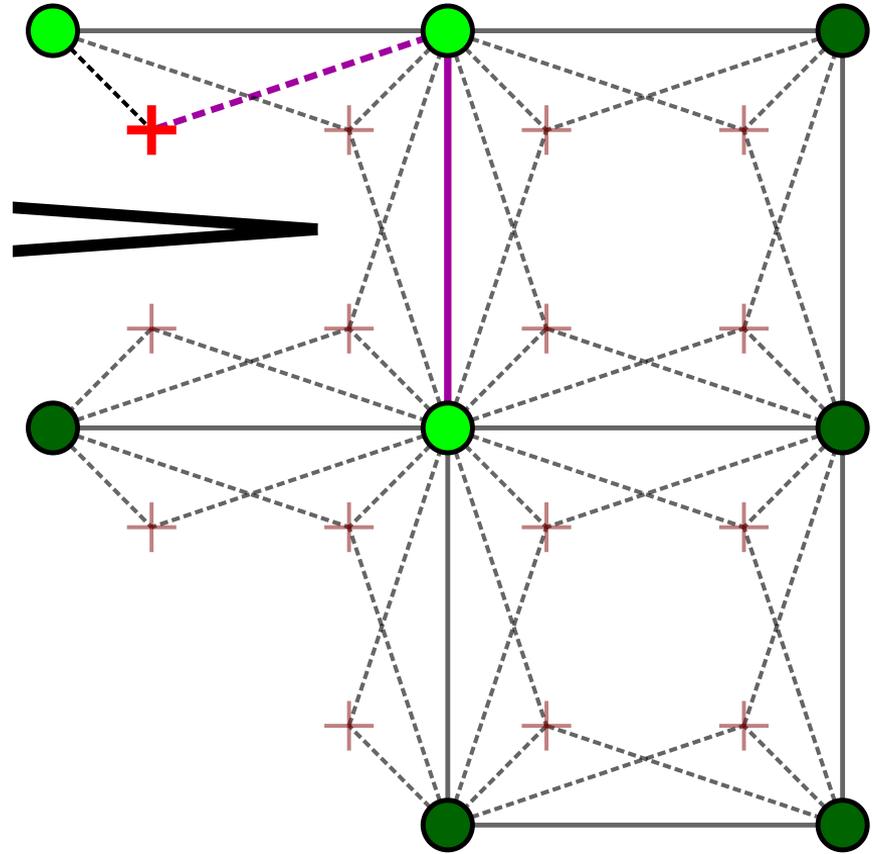
# Découpage - volume

- **Coupe les liens qui traversent la surface de coupe**
  - Particule-particule
  - Élément-particule
    - Primaire
    - Secondaire
- **Trouve des nouveaux voisins**
  - Non coplanaires
- **Aucun ajout d'éléments ou de particules**



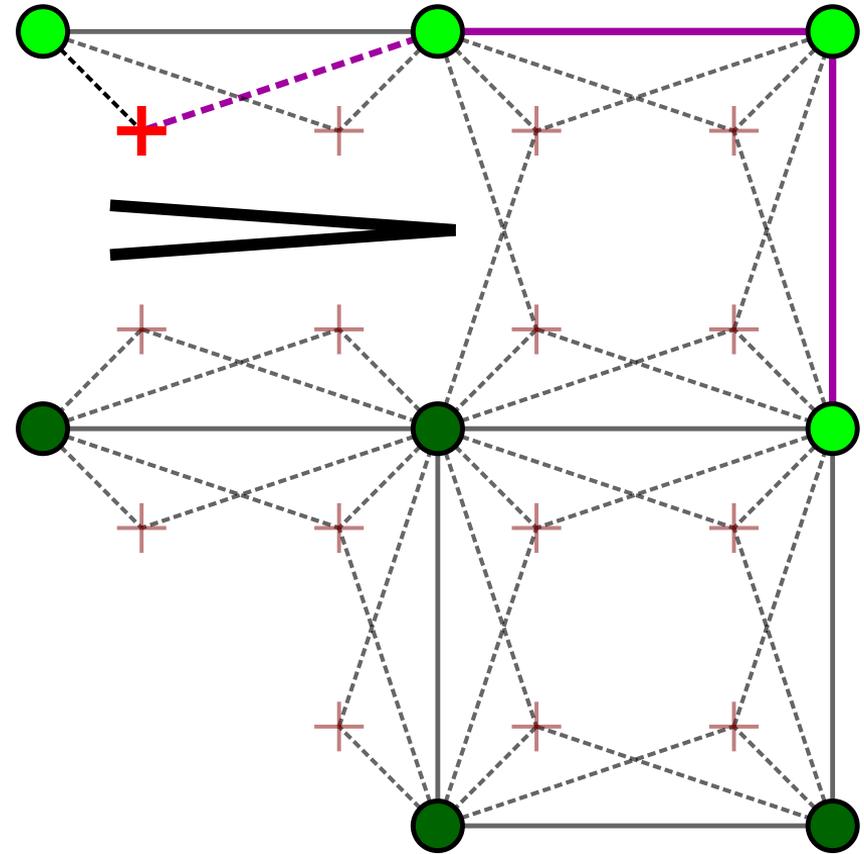
# Découpage - volume

- **Coupe les liens qui traversent la surface de coupe**
  - Particule-particule
  - Élément-particule
    - Primaire
    - Secondaire
- **Trouve des nouveaux voisins**
  - Non coplanaires
- **Aucun ajout d'éléments ou de particules**



# Découpage - volume

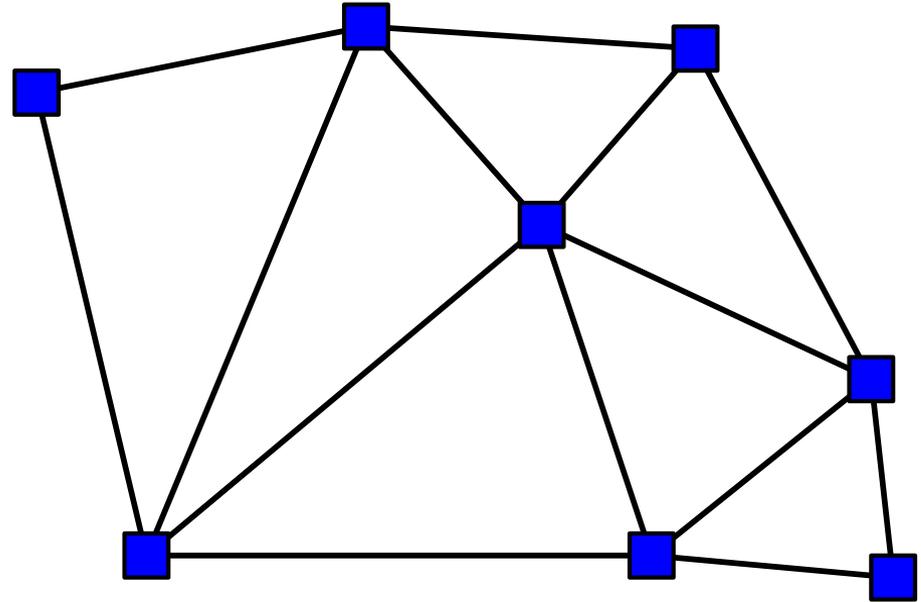
- **Coupe les liens qui traversent la surface de coupe**
  - Particule-particule
  - Élément-particule
    - Primaire
    - Secondaire
- **Trouve des nouveaux voisins**
  - Non coplanaires
- **Aucun ajout d'éléments ou de particules**



# Vidéo - tore de côté

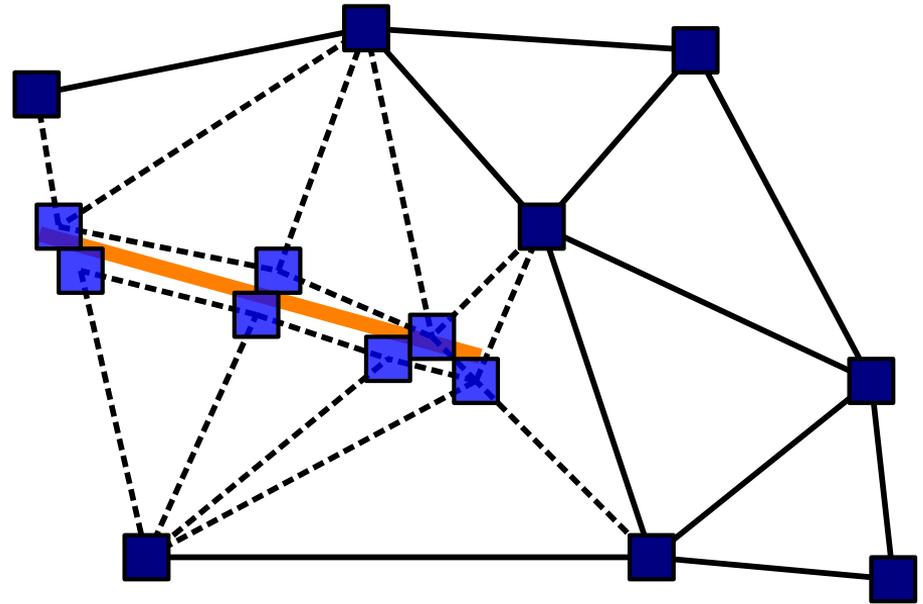
# Découpage - surface

- **Découpage de la surface extérieure**
- **Ajout de nouveaux sommets sur les arêtes coupées**
- **Ne change pas la courbure de la surface existante**



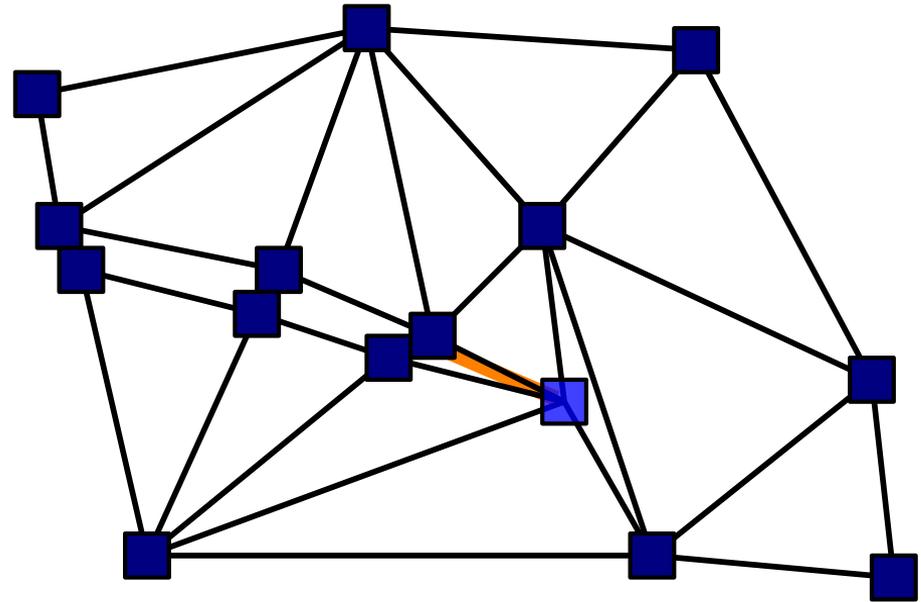
# Découpage - surface

- Découpage de la surface extérieure
- Ajout de nouveaux sommets sur les arêtes coupées
- Ne change pas la courbure de la surface existante



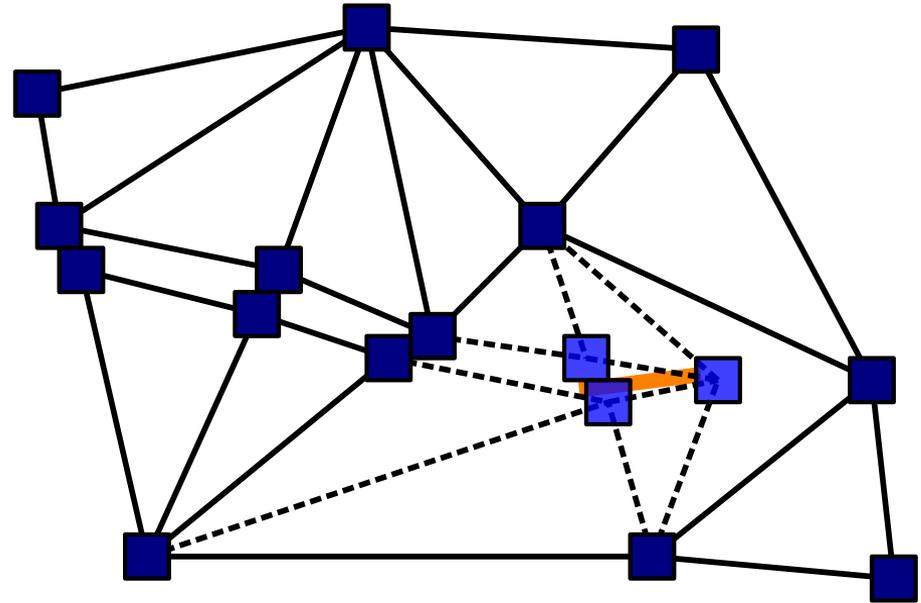
# Découpage - surface

- **Découpage de la surface extérieure**
- **Ajout de nouveaux sommets sur les arêtes coupées**
- **Ne change pas la courbure de la surface existante**



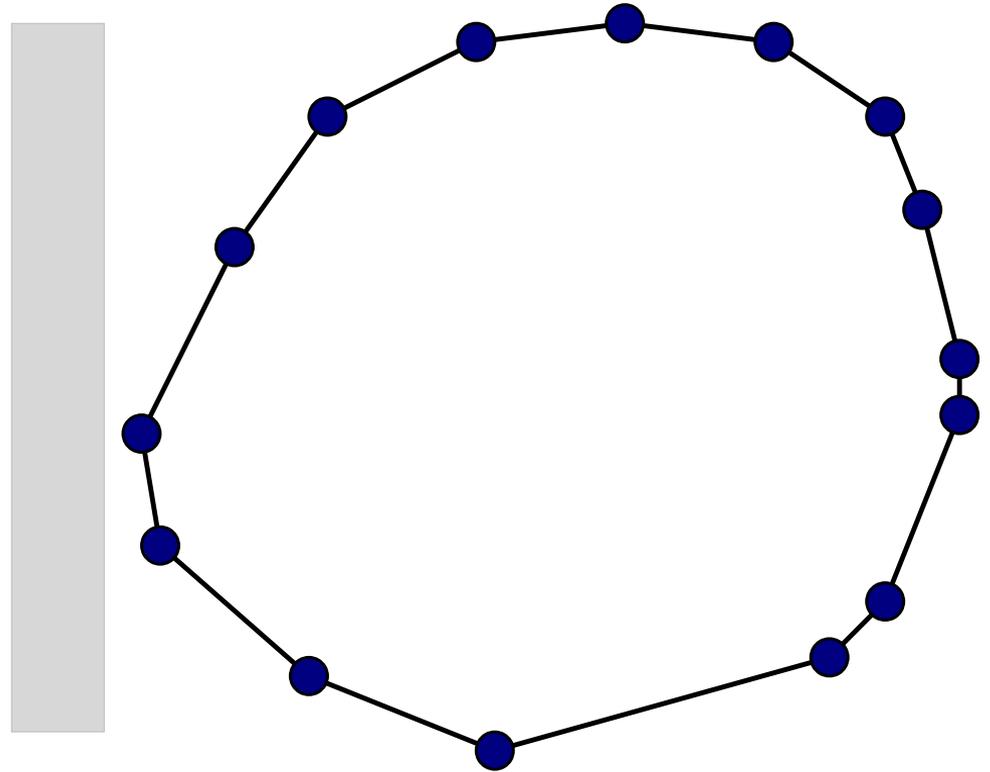
# Découpage - surface

- Découpage de la surface extérieure
- Ajout de nouveaux sommets sur les arêtes coupées
- Ne change pas la courbure de la surface existante



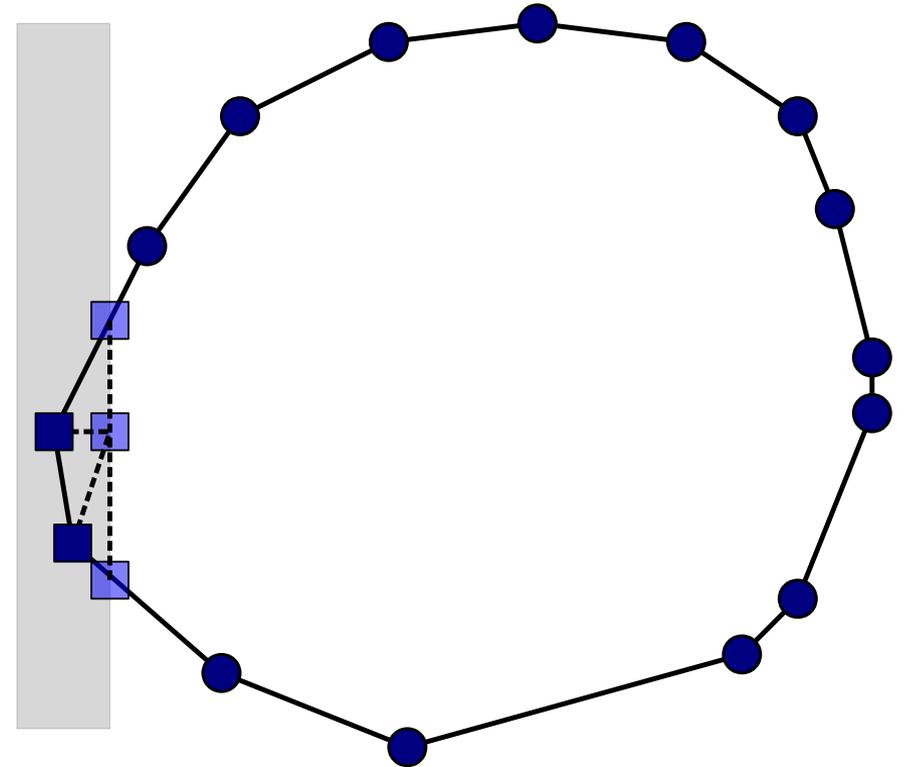
# Découpage - surface

- **Création d'une surface intérieure**
  - On voit ici une tranche intérieure de l'objet
- **Front de coupe**
- **Progression des sommets sur le front**
  - Étire les triangles existants
- **Sommets se fixent lorsque les triangles sont assez grands**



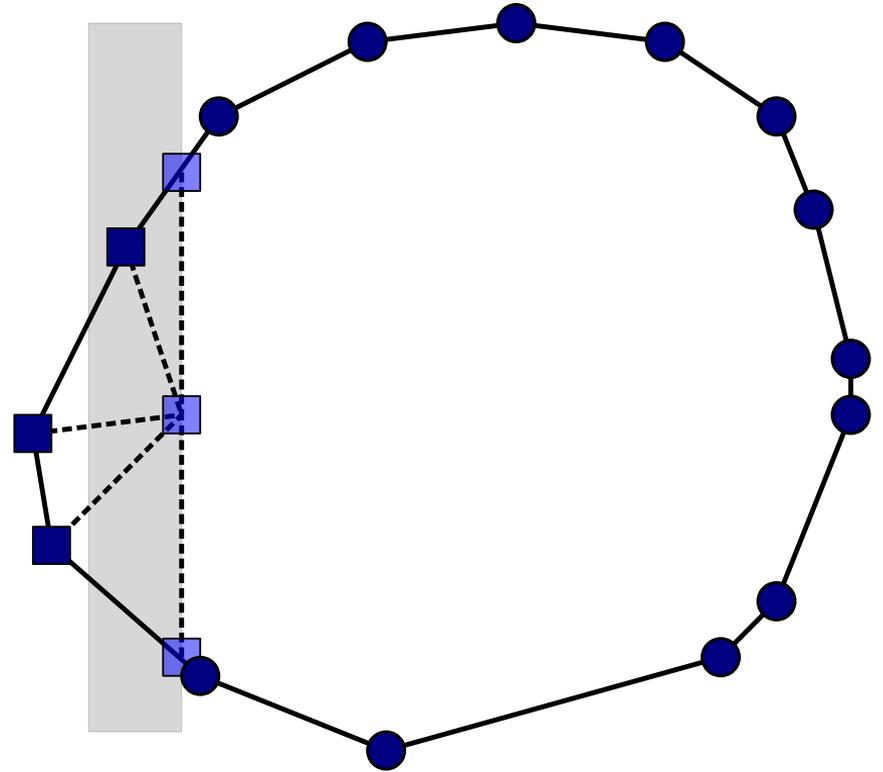
# Découpage - surface

- **Création d'une surface intérieure**
  - On voit ici une tranche intérieure de l'objet
- **Front de coupe**
- **Progression des sommets sur le front**
  - Étire les triangles existants
- **Sommets se fixent lorsque les triangles sont assez grands**



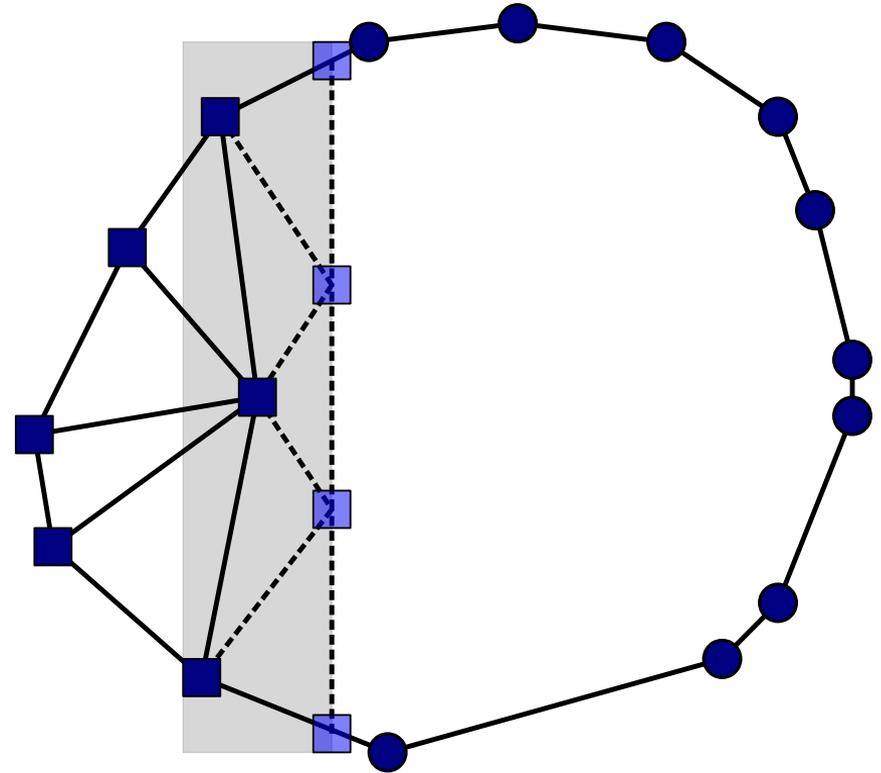
# Découpage - surface

- **Création d'une surface intérieure**
  - On voit ici une tranche intérieure de l'objet
- **Front de coupe**
- **Progression des sommets sur le front**
  - Étire les triangles existants
- **Sommets se fixent lorsque les triangles sont assez grands**



# Découpage - surface

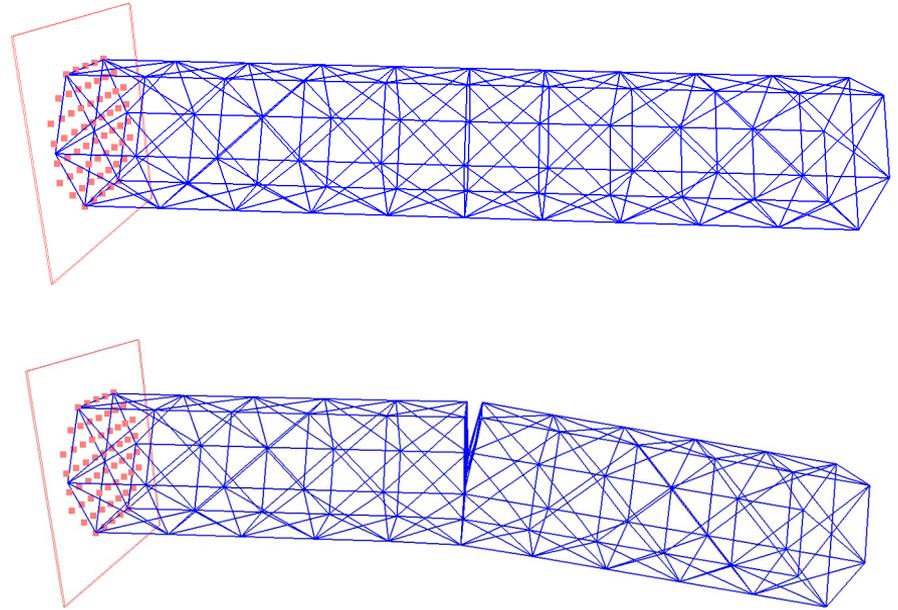
- **Création d'une surface intérieure**
  - On voit ici une tranche intérieure de l'objet
- **Front de coupe**
- **Progression des sommets sur le front**
  - Étire les triangles existants
- **Sommets se fixent lorsque les triangles sont assez grands**



# Vidéos - front de coupe

# Test du découpage - précision

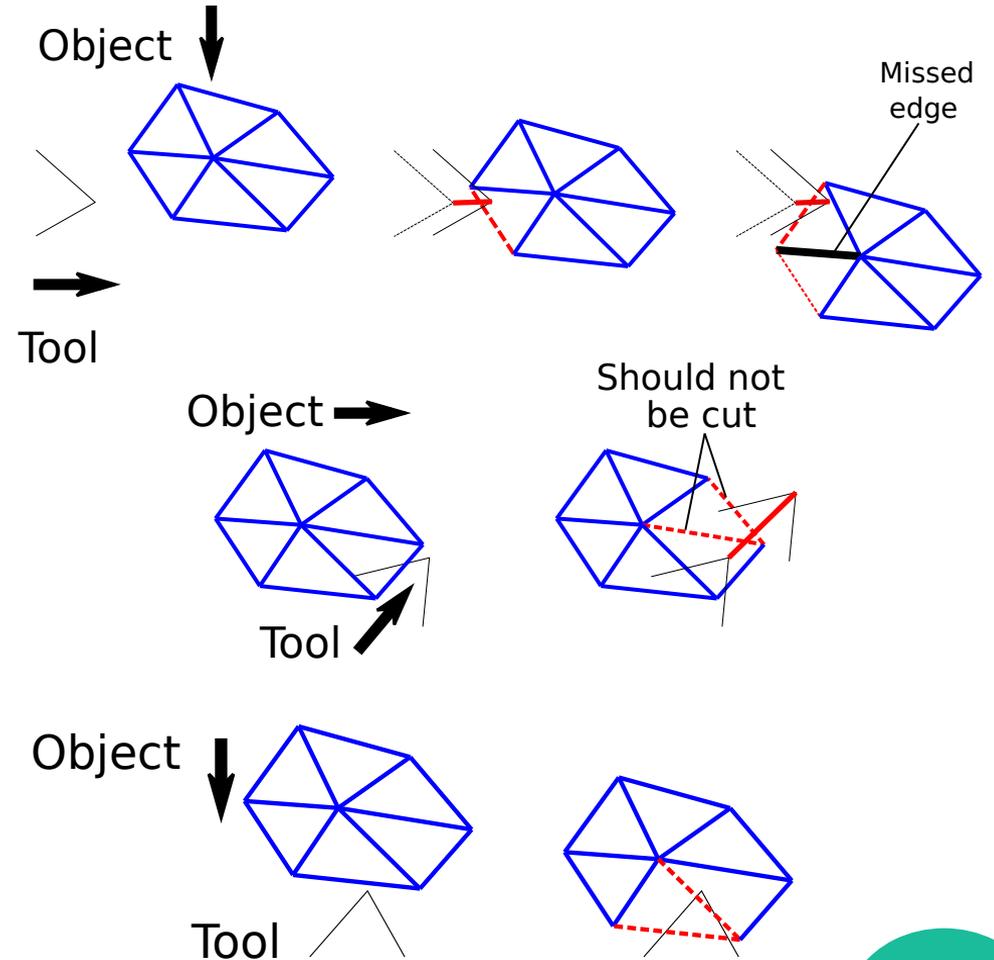
- Comparaison avec éléments finis (COMSOL)
- Mesure du déplacement de la surface
- À 10k DDL, <1% d'erreur par rapport à FEM/COMSOL, 250k DDL



# Vidéo - tore coupé en mouvement

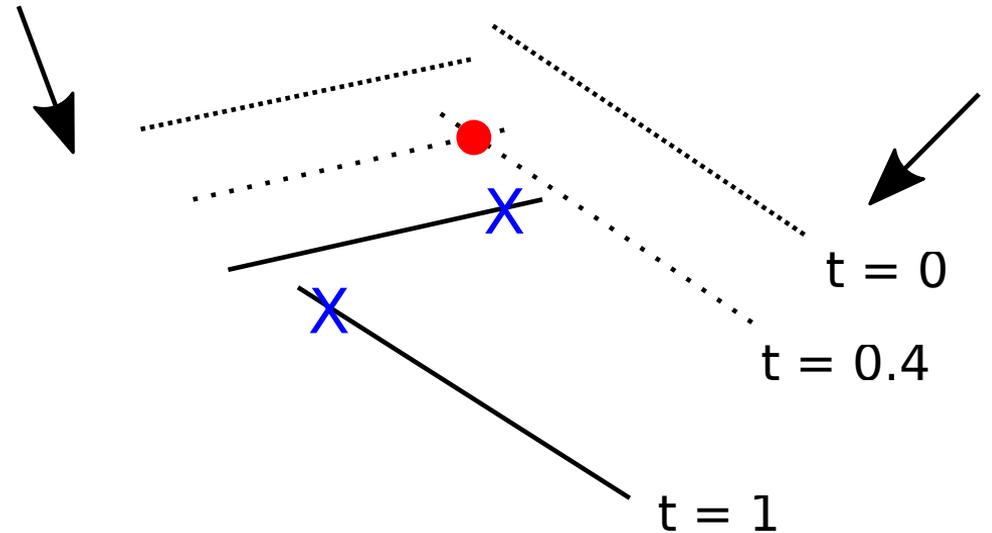
# Difficultés d'un outil "plan de coupe" interactif

- **Arête manquée**
- **Arête découpée de trop**
- **Outil immobile**

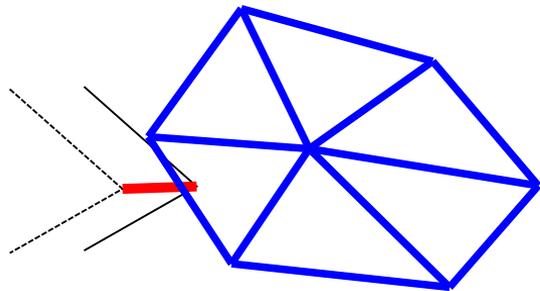


# Outil dynamique

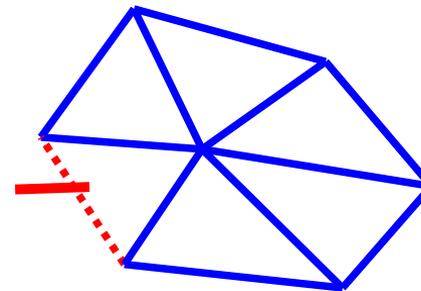
- **Outil composé d'arêtes**
  - Pas de surface balayée
- **Surface = un ensemble d'arêtes qui se déplacent**
- **Détection continue de collisions (CCD)**



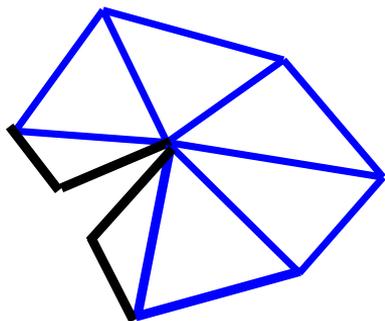
# Boucle d'animation



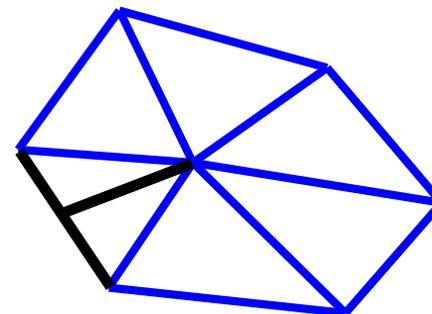
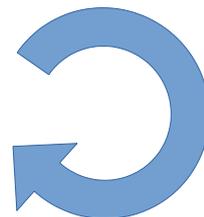
1. Déplacer l'outil



2. Détecter les collisions

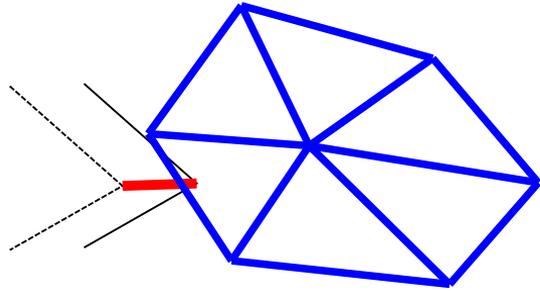


4. Calculer la déformation

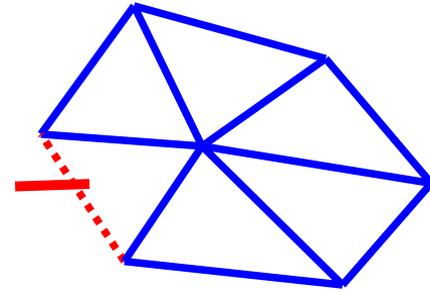


3. Découper

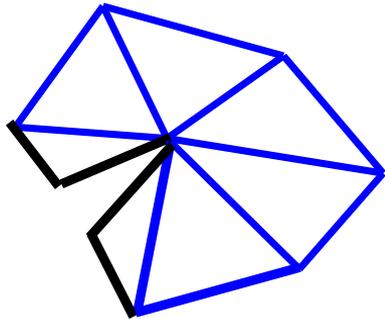
# Boucle d'animation



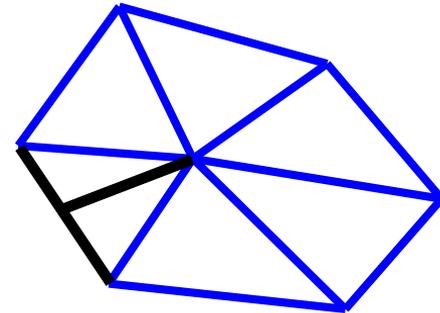
1. Déplacer l'outil (utilisateur)



2. Détecter les collisions (CCD)



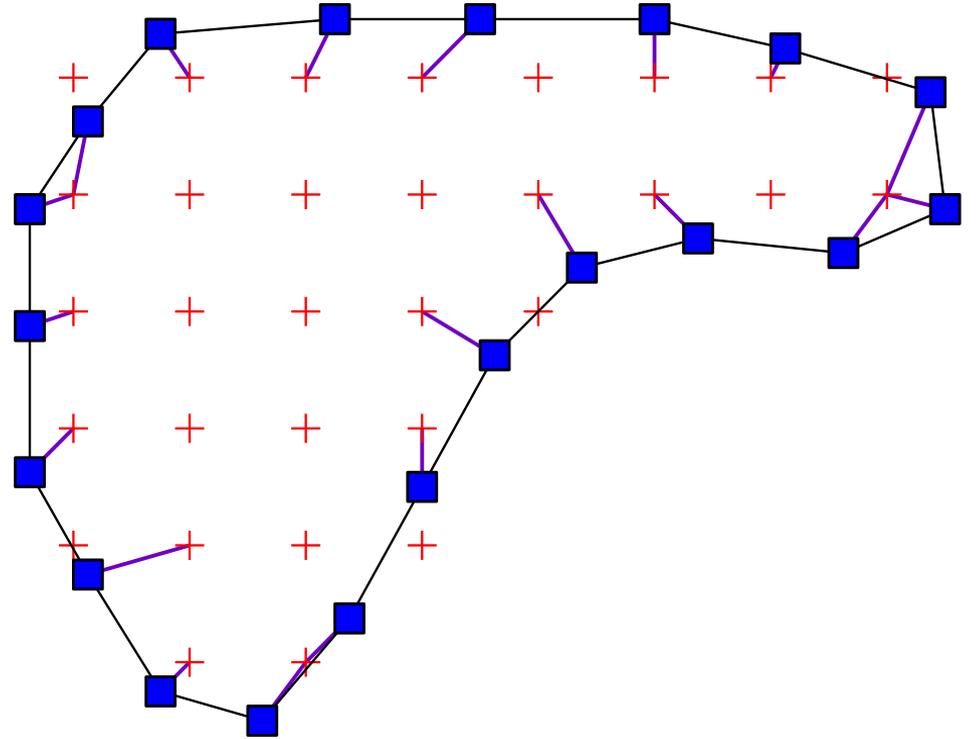
4. Calculer la déformation (EFG)



3. Découper (article 1)

# Mappage de surface - critères

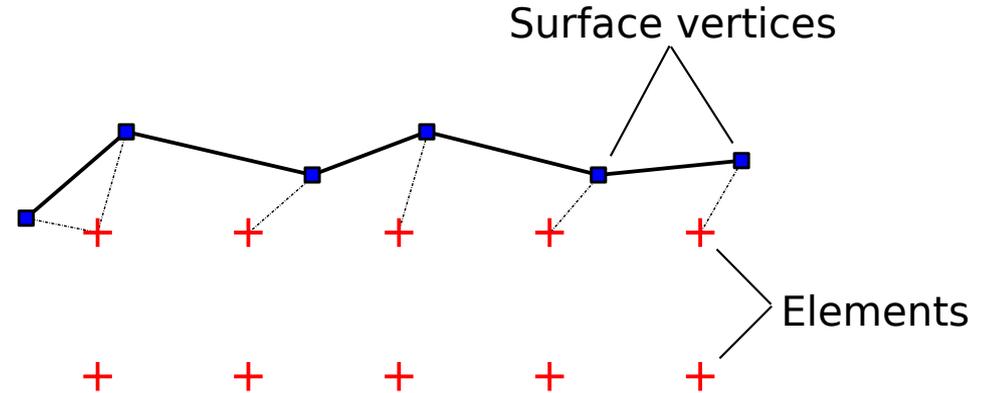
- **Trouver l'élément le plus approprié pour y attacher un certain sommet**



# Critères de mappage

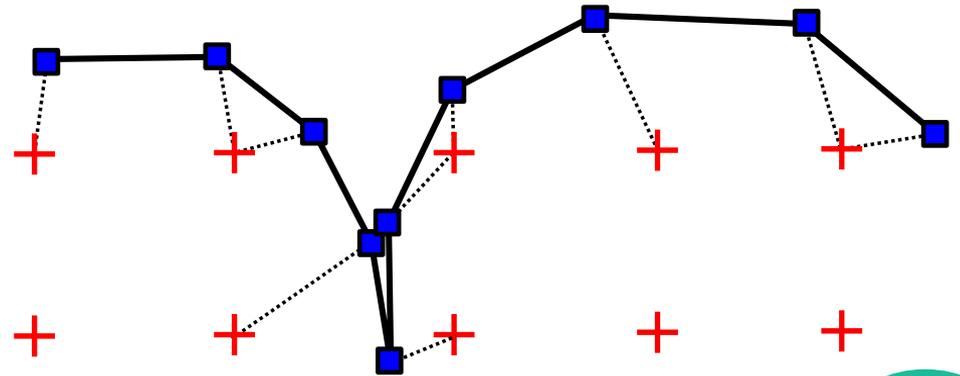
- **Proximité**

- Plus proche = mieux
- Ordonner les éléments



- **Visibilité**

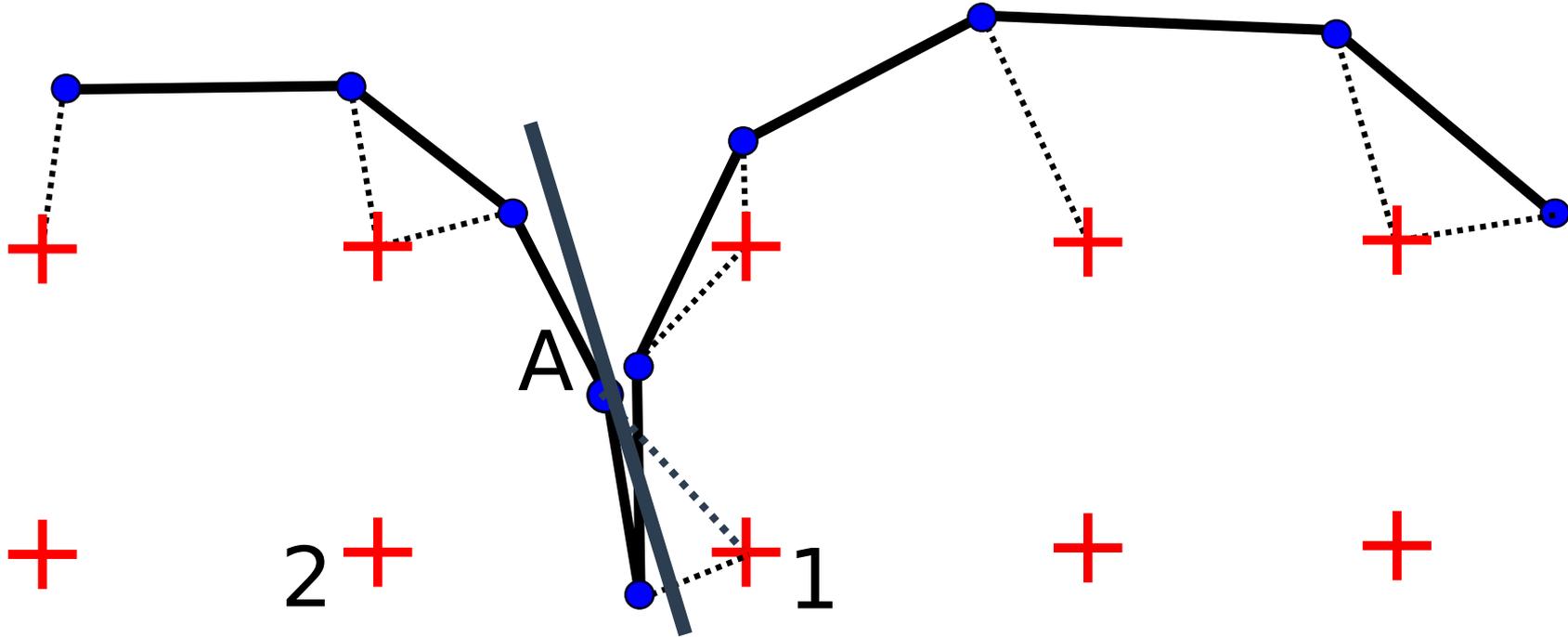
- Objet concave
- Discontinuités





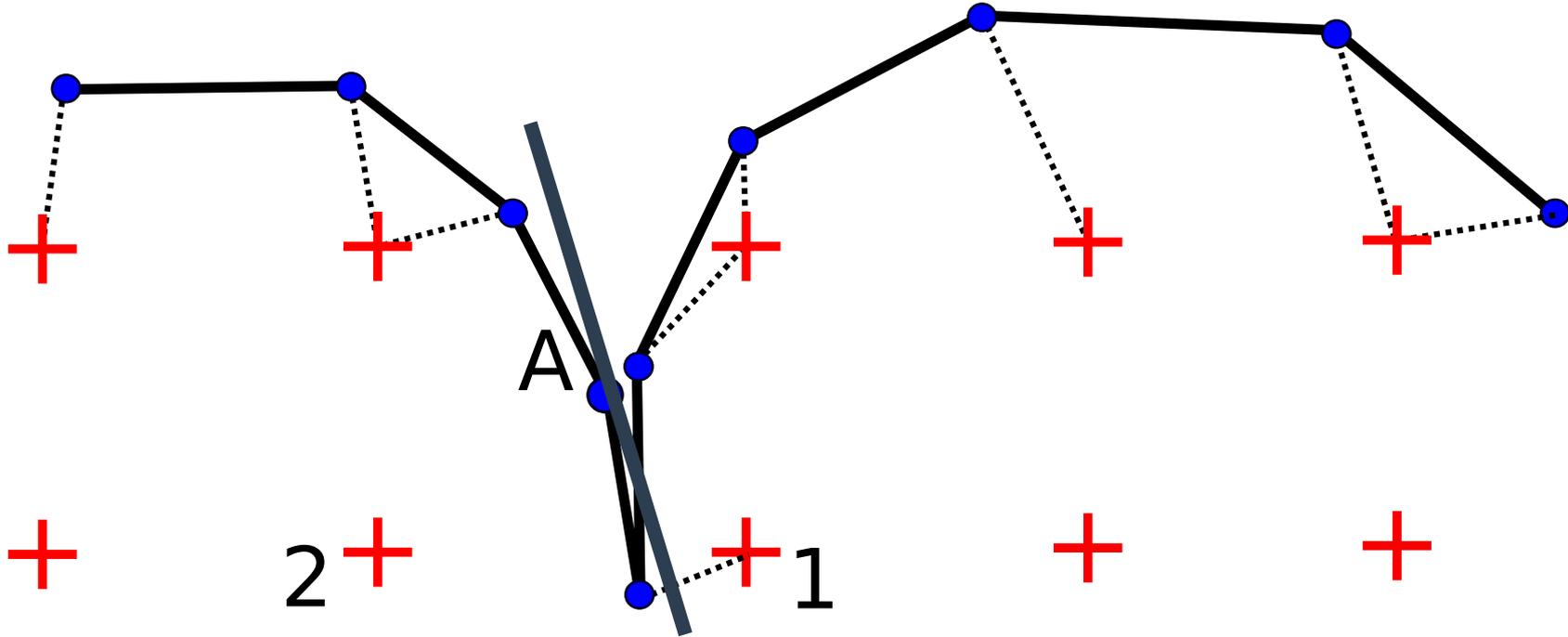
# Critère de visibilité - normale

- Utilisation de la normale à la surface



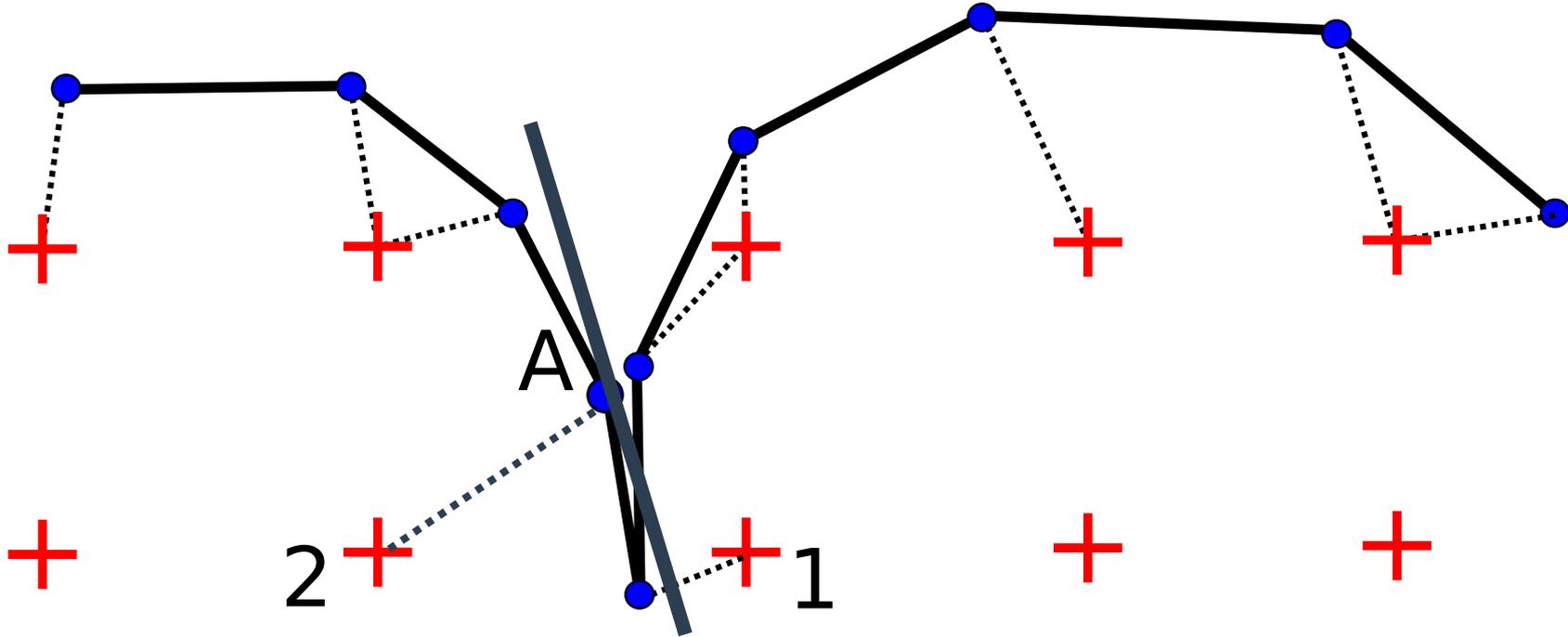
# Critère de visibilité - normale

- Utilisation de la normale à la surface



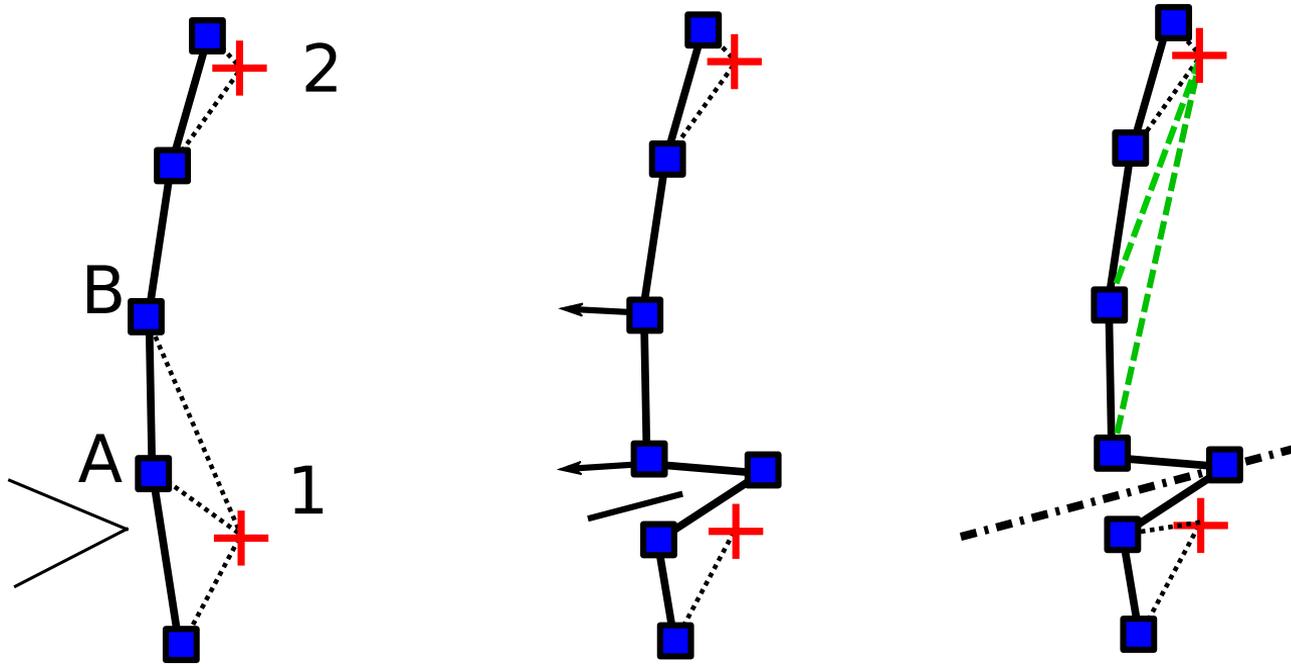
# Critère de visibilité - normale

- Utilisation de la normale à la surface



# Critère de visibilité - plan additionnel

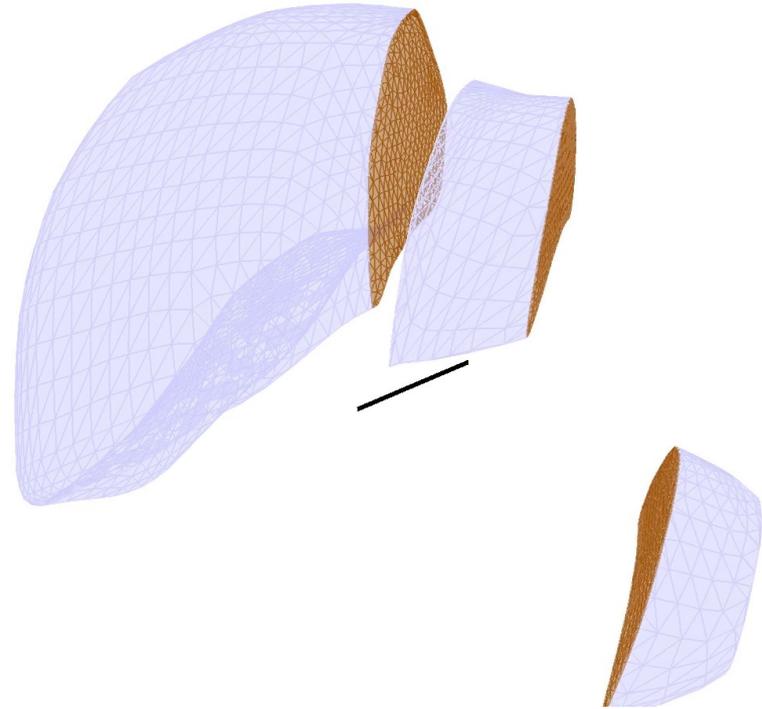
- Représenté par une normale





# Implantation GPU

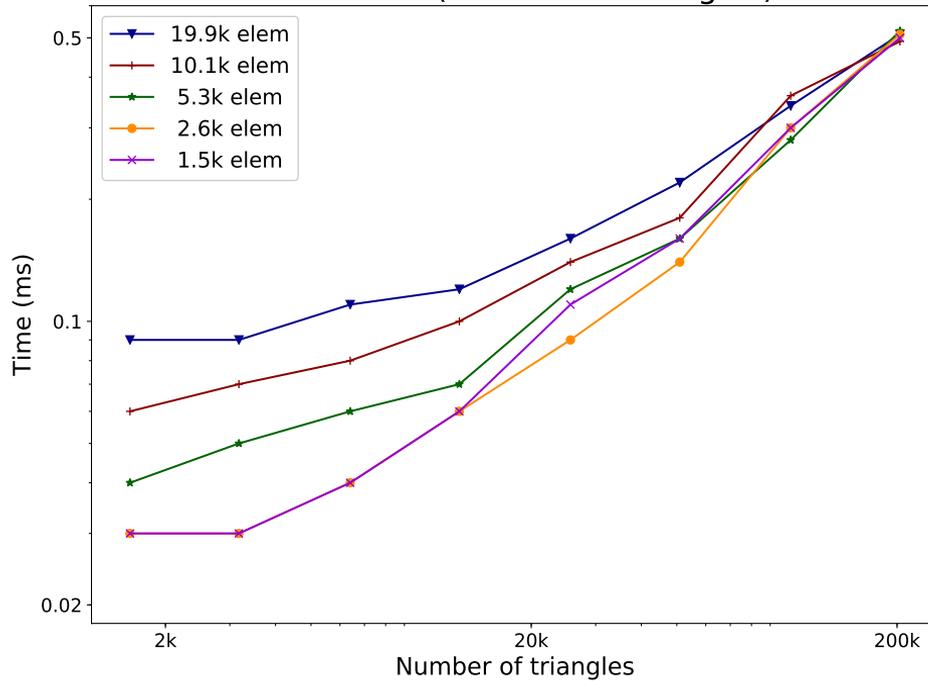
- **GPU = vite**
- **Augmenter la résolution**
  - Surface ET volume
- **Augmenter la complexité du modèle**
- **Ajouter des éléments à la simulation (retour haptique, collisions objet-objet, meilleur rendu, etc.)**



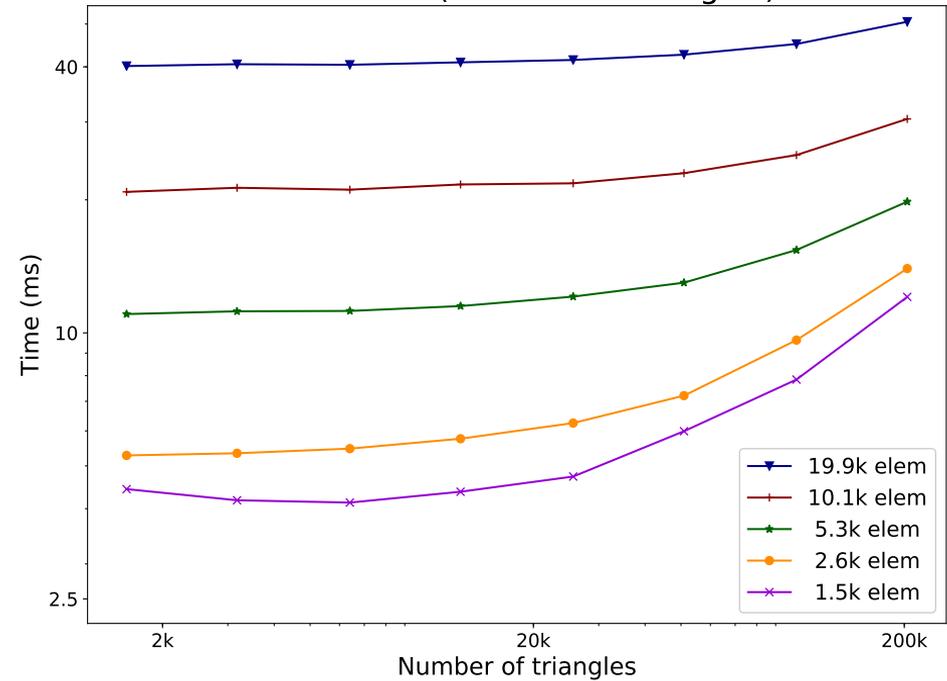
# Test du découpage - performance

- Découpage d'un objet à différentes résolutions (volume et surface)

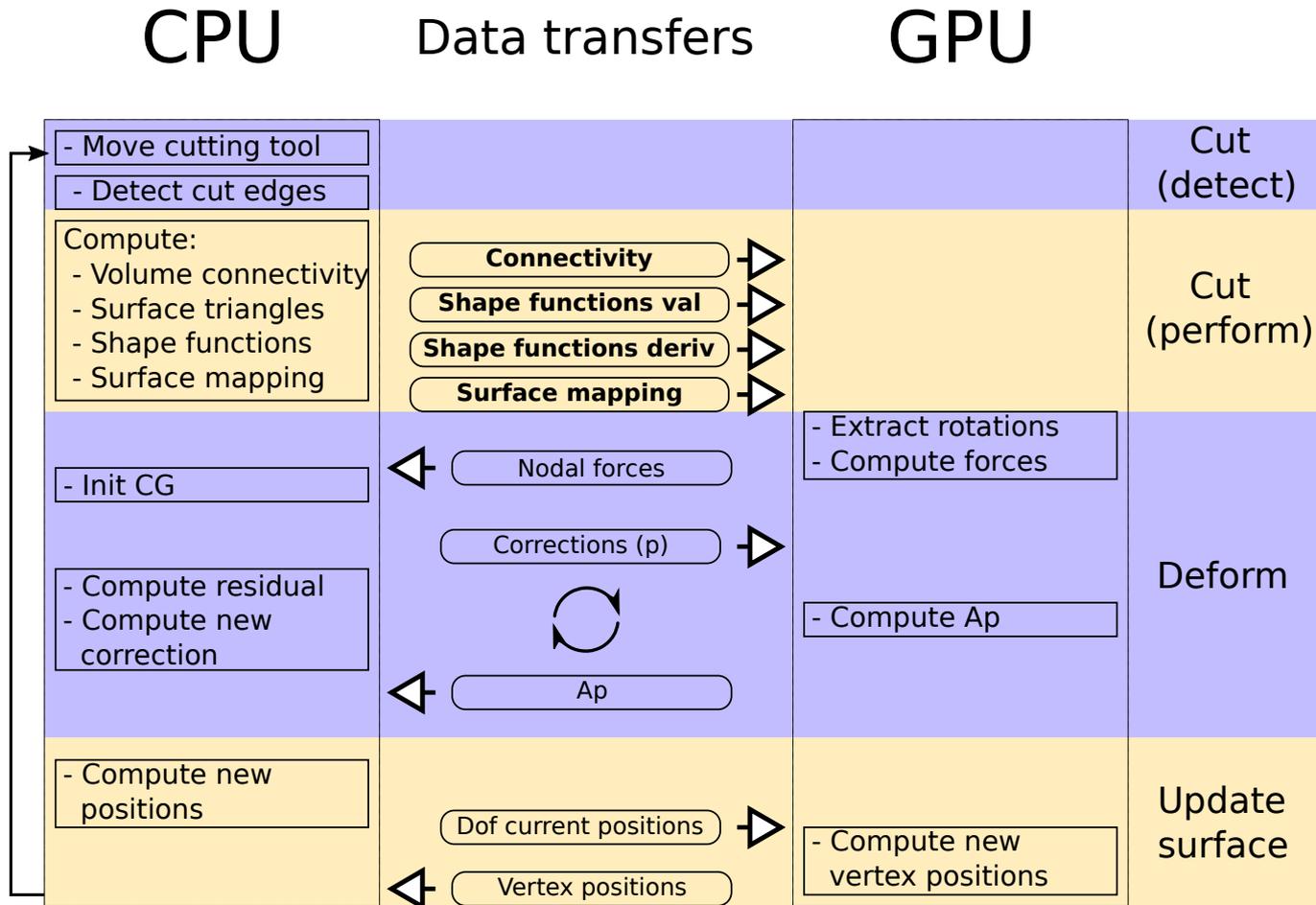
Cutting time with respect to surface mesh size (number of triangles)



Total simulation time with respect to surface mesh size (number of triangles)



# Transferts de données

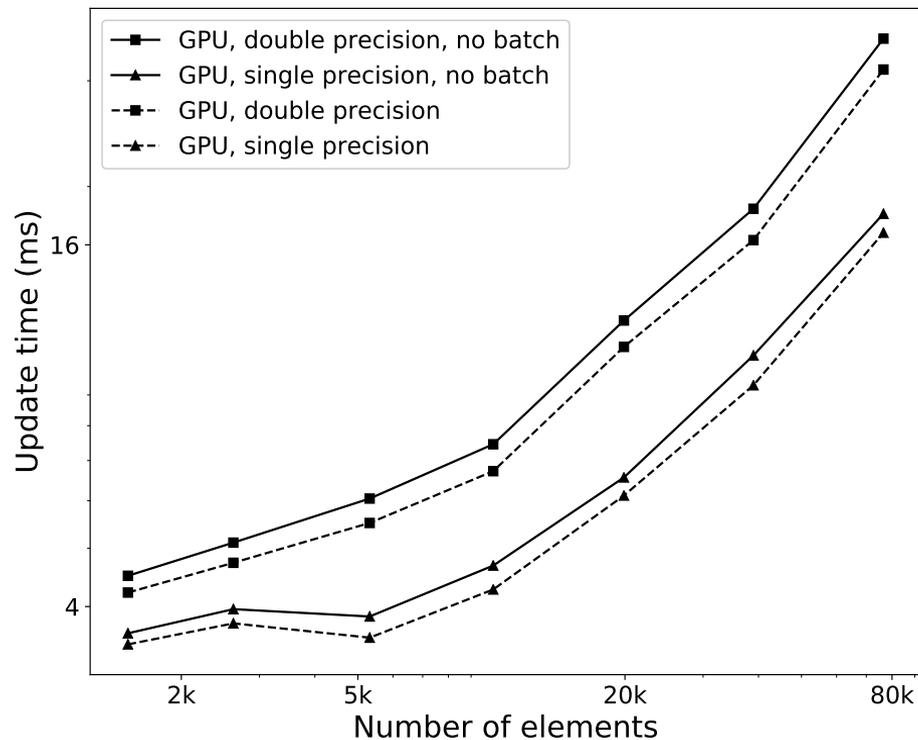
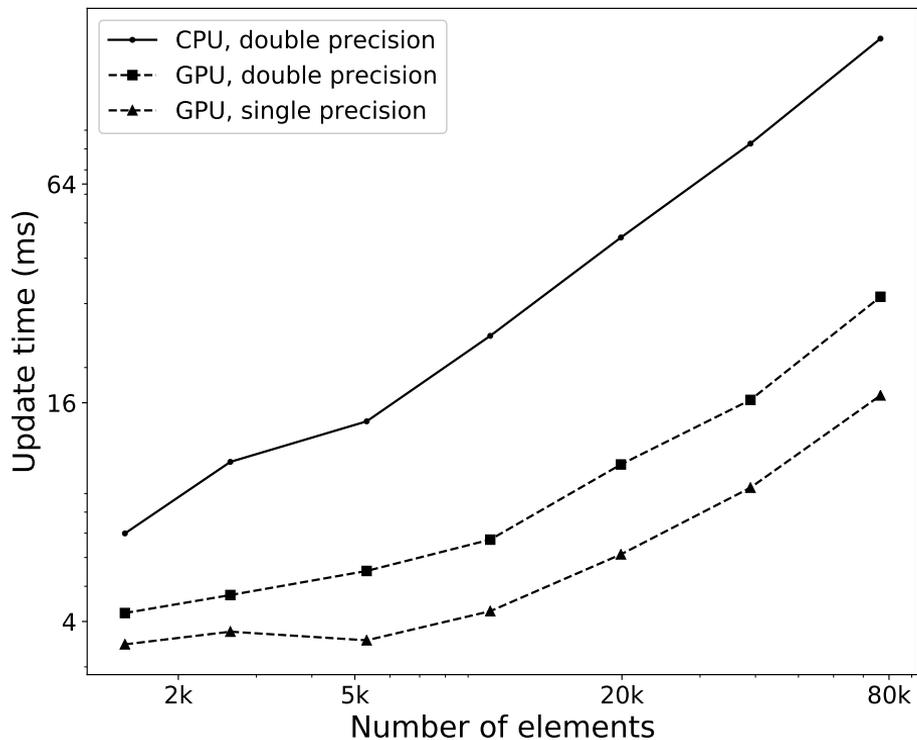


# Description de la connectivité

- **Structure irrégulière dans un tableau régulier**
- **Aucune (ré)allocation de mémoire lors du découpage**
- **Subdivision en lots**

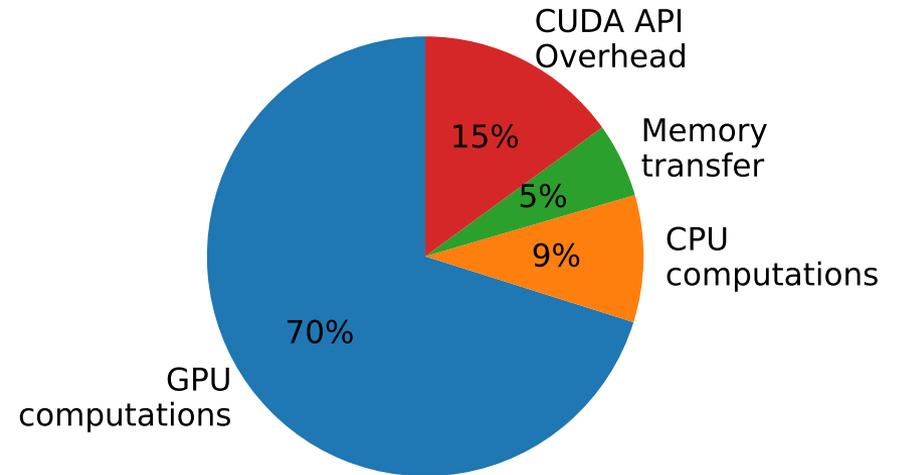
Row data								Row lengths
6	4	5	3	8	1			6
5	6	4	2	3				5
1	2	4	8	9	7	3		7
3	4	7	10	11	9	8	12	8
7	8	9	12	13	15			6
								⋮
								⋮

# Implantation GPU - performance



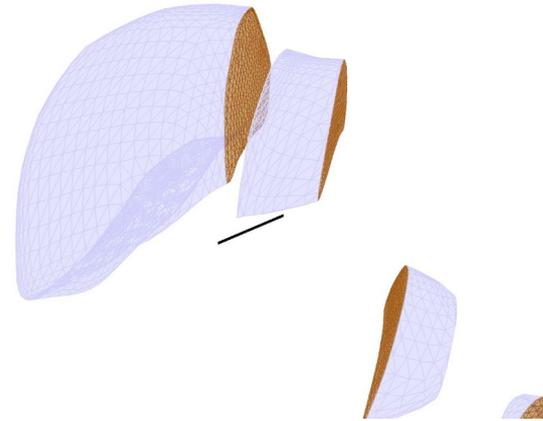
# Groupement des transferts

- **Réduction de la quantité transférée de 80 à 90%**
- **Augmentation du nombre de transferts**
  - Surcoût important



Utilisation du temps GPU pour la déformation

- **Outil physique**
- **Retour haptique**
- **Collisions entre objets**
  - Organe - organe
  - Organe - outil



# Questions

