

# Décomposition de matroïdes orientés:

CR5 Partie mathématique.

MARIN Yann

2 mars 2022

Ce CR5 traite la partie plus mathématiques du sujet. Une introduction aux matroïdes orientés est donc nécessaire et fera l'objet de la première partie, ensuite nous expliciterons l'utilisation de cette théorie mathématique dans notre cadre concret de représentation de modèles 3D et de mesure d'interaction.

Notre but est à la fois de trouver une application pratique (algorithmique) mais aussi théorique et de généraliser nos notions à des matroïdes orientés abstraits.

## Table des matières

0.1	Glossaire . . . . .	1
<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Critères d'interactions</b>	<b>3</b>
2.1	Taux d'interactions . . . . .	3
2.2	Intersection . . . . .	5
2.3	Intrication . . . . .	5
2.4	Cocircuit d'un matroïde orienté . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Partie Algorithmique</b>	<b>8</b>
3.1	Vision "moteur d'application" . . . . .	9
3.1.1	Notion de position . . . . .	9
3.1.2	Notion de rotation . . . . .	11
3.1.3	D'autre notion . . . . .	11
3.1.4	Réflexion personnelle . . . . .	11
<b>4</b>	<b>En dimension 3 (d=4)</b>	<b>12</b>
4.1	Rotation . . . . .	12

### 0.1 Glossaire

- $E = \{1 :: n\}$  ensemble de  $n$  points.
- $d$  la dimension d'un espace affine, par défaut  $d=4$ .
- $B$  l'ensemble des  $\binom{n}{d}$   $d$ -uplets sur  $E$ .
- $X \subseteq B$  un ensemble de  $d$ -uplets.
- $P \subseteq E$  un ensemble de points.
- $S_P \subseteq B$  l'ensemble des  $\binom{|P|}{d}$   $d$ -uplets dans  $P$ .
- $L = \{P \subseteq E | S_P \subseteq X\}$

- $\overline{X} = E - X$
- $\overline{L} = \{P \subseteq E | \exists x \in \overline{X} \text{ tq } x \in S_P\}$
- $\max(L) = \{P \in L | \text{ si } P \subseteq P' \in L \text{ alors } P = P'\}$
- $X_P = X \cap S_P$
- $\mathcal{B}$  l'ensemble des bases d'un matroïdes.
- $\mathcal{X}$  un chirotope.

## 1 Introduction

Les matroïdes (orientés et non orientés) sont des objets mathématiques généralisant la notion de dépendance d'algèbre linéaire des matrices (d'où le nom matroïde). Ils peuvent être définis par différents axiomes (indépendants, circuit, bases ...) et ont des applications dans divers domaines comme les graphes et la programmation linéaire. Les matroïdes font ressortir un lien profond entre géométrie et combinatoire.

Les matroïdes orientés complètent cette notion de matroïde en apportant principalement la notion de convexité aux matroïdes et des représentations topologiques.

La théorie des matroïdes est vaste et il y a de nombreuses définitions. Dans ce CR nous prenons la partie de n'introduire que ce qui est nécessaire en parallèle avec les applications que nous trouvons.

### Problème 1 *CECI EST UN PB A DISCUTER :*

*dans tout ce qui suit, rien n'empêche de compter les d-uplets qui sont toujours de signe 0 dans  $\mathcal{M}$  comme "constant". On pourrait considérer des sous-modèles quasi constants (des SM dont tous les d-uplets non constants seraient de signes 0 dans tous les modèles). Il faudrait voir dans les exemples si les sous-modèles quasi constants ne seraient pas plus grands que les SMC. Pour le moment on s'est peut intéresser à ces d-uplets car ce ne sont pas des bases du matroïde, mais justement le fait que ce ne soit jamais des bases est peut être tout aussi intéressant. Voir même, lorsqu'on a de tel d-uplet est-ce que cela ne veut pas dire que l'on peut retirer certains points ? A REFLECHIR.*

**Définition 1.1 (Bases d'un matroïde)** Soit  $E=1 : :n$  et  $\mathcal{B} \subseteq E$  tel que :

(B1)  $\mathcal{B} \neq \emptyset$

(B2) Soient  $B_1$  et  $B_2 \in \mathcal{B}$  tel que  $B_1 \neq B_2$  et  $e \in B_1 - B_2$  alors  $\exists f \in B_2 - B_1$  tel que  $B_1 - e + f \in \mathcal{B}$

Alors  $\mathcal{B}$  est l'ensemble des bases d'un matroïde sur  $E$  que l'on note  $M(E, \mathcal{B})$ .

**Remarque 1.1** La notion de base d'un matroïde correspond dans les graphes à celle d'arbre couvrant, dans une famille de vecteur aux ensembles générateurs indépendants (c'est à dire aux base de l'espace linéaire), dans un graphe biparti aux couplages maximaux, dans une grille "lattice path" aux chemins compris entre deux autres chemins...De plus, les différentes façons de choisir  $\binom{n}{k}$  forment aussi un matroïde appelé matroïde uniforme.

**Exemple 1.1** Soit  $E$  un ensemble de points dans un espace en trois dimension et  $\mathcal{B}$  l'ensemble des 4-uplets de  $E$ . Alors  $\mathcal{B}$  est l'ensemble des bases d'un matroïde. En effet il s'agit du matroïde uniforme  $U_{4,n}$ .

**Définition 1.2 (Orientations de base de matroïdes et chirotope)** Soit  $E=1 : :n$  et  $\mathcal{B}$  un ensemble de parties de  $E$  de taille  $r$  et une fonction  $\mathcal{X} : E^r \rightarrow (+, 0, -)$ . Alors  $M(E, \mathcal{B})$  est un matroïde orienté si et seulement si  $\mathcal{X}$  vérifie les conditions suivantes :

(X1)  $\mathcal{B} \neq \emptyset$ .

(X2)  $\forall B \text{ et } B' \in \mathcal{B} \text{ et } e \in B - B', \exists f \in B' - B \text{ tel que } B - e + f \in \mathcal{B}$ .

(X3)  $(b_1, b_2, \dots, b_r) \in \mathcal{B} \text{ ssi } \text{sign}\mathcal{X}(b_1, \dots, b_r) \neq 0$ .

(X4) Soit  $\sigma$  une permutation. Alors  $\mathcal{X}(\sigma(b_1), \dots, \sigma(b_r)) = \text{sign}(\sigma)\mathcal{X}(b_1, \dots, b_r)$ .

(X5)  $\forall b_1, \dots, b_r, x, y \in E$ , si  $\mathcal{X}(x, b_2, \dots, b_r)\mathcal{X}(b_1, y, b_3, \dots, b_r) \geq 0$  et  $\mathcal{X}(y, b_2, \dots, b_r)\mathcal{X}(x, b_1, b_3, \dots, b_r) \geq 0$  alors  $\mathcal{X}(b_1, b_2, \dots, b_r)\mathcal{X}(x, y, b_3, \dots, b_r) \geq 0$ .

$\mathcal{X}$  est appelé *chirotope* et  $M(E, \mathcal{X})$  est un *matroïde orienté*.

**Proposition 1.1** Soit  $E$  un ensemble de  $n$  points dans un espace (affine) de dimension  $d$ , et soit  $\mathcal{B}$  l'ensemble des  $d$ -uplets de  $E$  qui ne sont pas entièrement contenus dans un hyperplan. Alors  $\mathcal{X} : B \in \mathcal{B} \rightarrow \text{sign}(\det(B))$  donne un matroïde orienté  $M(E, \mathcal{X})$ .

Nous nous intéresserons particulièrement au cas  $d=4$  (espace à 3 dimensions) et à  $d=3$  (espace à 2 dimensions).

## 2 Critères d'interactions

### 2.1 Taux d'interactions

**Définition 2.1** *Chirotopes d'un ensemble de modèles* Soit  $\mathcal{M}$  un ensemble de modèles dont les points sont labélisés par  $E=1 : :n$  et  $M \in \mathcal{M}$  un modèle. Alors  $\mathcal{X}_M$  est l'ensemble des signes des  $d$ -uplets sur  $M$ .

**Remarque 2.1**  $\mathcal{X}_M$  est l'information principale que nous possédons dans ce stage, pour le moment on est capable de le calculer sur une centaine de point. Mais cela demande beaucoup trop de ressource et l'un des buts implicites de ce stage est de réduire le nombre de 4-uplets à utiliser. D'une première part en décomposant les modèles en sous-modèles constants (cf CR 1-4) et d'une autre en identifiant les 4-uplets qui sont les plus significatifs pour mesurer les interactions entre deux sous-modèles constants.

Dans toute la suite, on se placera en deux dimension avec  $E=1 : :n$  et une bipartition  $M_1, M_2$  de  $E$  en deux sous modèles constants. Le nombre d'orientation de triangle à calculer passe donc à  $\binom{n}{k} - \binom{n}{|M_1|} - \binom{n}{|M_2|}$ . **Pour minimiser ce nombre il faut que  $|M_1| \simeq |M_2|$ .**

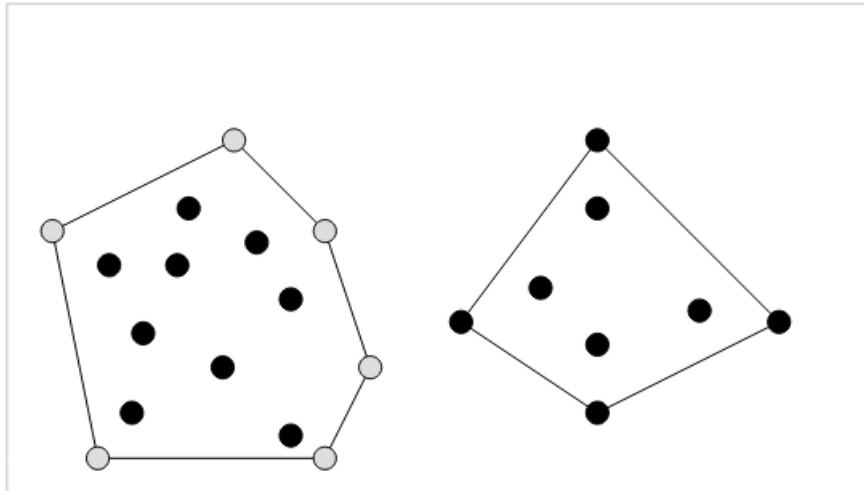


FIGURE 1 – A gauche,  $M_1$  et son polytope convexe, a droite  $M_2$  et son polytope convexe. Les points en gris sont  $fr(M_1)$ .

**Proposition 2.1** *En deux dimensions, en dehors des triangles de  $M_1$  ou de  $M_2$  tous 3-uplets de  $E$  possède soit un segment de  $M_1$  et un point de  $M_2$  soit le contraire. Dans le premier cas le signe du triangle formé détermine alors dans quel demi-plan se situe le point de  $M_2$  par rapport à la droite formé par le segment de  $M_1$ .*

**Remarque 2.2** *Comme l'orientation d'un triangle dépend aussi de l'orientation de l'espace, qui est arbitraire, il est plus judicieux de dire que deux triangles ont la même orientation plutôt que de dire qu'ils sont tous les deux du signe + ou du signe -. En pratique cependant, cette information supplémentaire peut être simplifier les calculs.*

**Exemple 2.1** *Soit  $M_1$  le SMC de  $E$  l'ensemble des points noirs dans la figure suivante.*

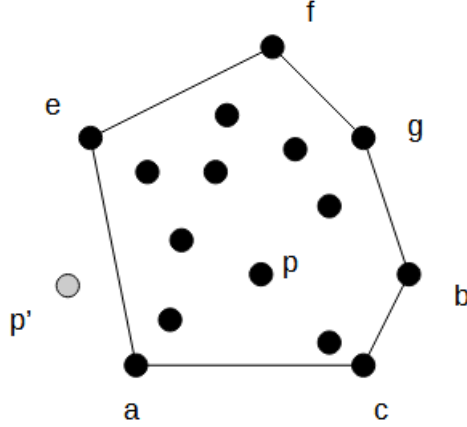


FIGURE 2 – En noir  $M_1 \subseteq E$  un SMC.

Comme  $\text{sign}(acp) = \text{sign}(acp')$  alors  $p$  et  $p'$  sont dans le même demi-plan par rapport à la droite  $(ac)$ . C'est aussi vrai pour les droites  $(cb)$ ,  $(bg)$ ,  $(gf)$  et  $(fe)$ . Par contre, comme  $\text{sign}(eap) = -\text{sign}(eap')$  alors  $p$  et  $p'$  sont dans deux demi-plans différents par rapport à  $(ea)$ .

**Remarque 2.3** *En trois dimensions il y a deux types de tétraèdres : ceux qui ont trois sommets dans  $M_1$  (ou  $M_2$ ) et un sommets dans  $M_2$  (ou  $M_1$ ) et ceux qui ont deux sommets dans chacun des deux.*

*La plupart de ce que l'on va faire en deux dimensions va marcher en trois dimensions avec les tétraèdres de type 1. En revanche, l'étude des tétraèdres de type 2 devra se faire autrement. ( l'étude de la rotation de  $M_2$  par rapport à  $M_1$  est une piste possible).*

**Proposition 2.2** *(à vérifier) En deux dimension, tous changements de signe d'un triangle donne une information sur la position d'un SMC par rapport à l'autre. En particulier, plus il y a de changements de signe, plus il y a de changement. (Cela peut donner un critère de "broad phase", dans un moteur physique il s'agit d'une phase pour savoir si cela vaut le coup de chercher s'il y a une intersection entre deux objets.)*

Cette proposition découle directement de la proposition précédente. Mais on peut réduire le nombre de triangle à regarder. En cherchant par exemple un critère d'intersection.

## 2.2 Intersection

**Proposition 2.3** (*Intersection*) Soit  $p_1 \in M_1$ . Alors un point  $p_2 \in M_2$  intersecte  $M_1$  si et seulement si l'orientation de tous les triangles formés par un segment de  $M_1$  et  $p_2$  est la même que celles des triangles formés par un segments de  $M_1$  et  $p_1$ . En particulier, il suffit de vérifier cette propriété sur les segments qui sont des arêtes du polytope convexe associé à  $M_1$ .

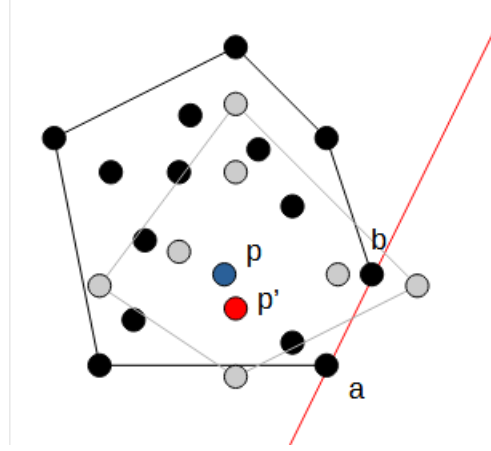


FIGURE 3 – En noir,  $M_1$  et son polytope convexe avec  $p \in M_1$ , en gris  $M_2$  et son polytope convexe avec  $p' \in M_2$ . Comme  $\text{sign}(abp) = \text{sign}(abp')$  alors  $p'$  est du même côté de  $(ab)$  que  $p$ . Comme cette propriété est vraie pour toutes les arêtes  $ab$  de  $M_2$  et que  $p$  est à l'intérieur de  $\text{conv}(M_1)$  alors il en est de même pour  $p'$ .

Ici le nombre d'orientations de triangle à regarder est passé à  $\binom{|fr(M_1)|}{2}|M_2| + \binom{|fr(M_2)|}{2}|M_1|$  où  $fr(M_i)$  désigne les sommets du polytope convexe associé à  $M_i$ . Techniquement, pour l'intersection on peut descendre à  $\binom{|fr(M_1)|}{2}|fr(M_2)| + \binom{|fr(M_2)|}{2}|fr(M_1)|$  triangles.

**Remarque 2.4** Une possibilité pour avoir une information sur l'intrication entre deux SMC est de compter le nombre d'intersections. Dans la figure précédente on aurait par exemple 5 points de  $M_2$  dans  $M_1$  et 4 points de  $M_1$  dans  $M_2$  (plus deux qui sont dans des arêtes du polytope de  $M_1$  et qui ne sont donc pas à l'intérieur).

**Remarque 2.5** Il existe une intersection entre  $M_1$  et  $M_2$  qui ne fait intervenir qu'un seul changement de signe de triangle.

## 2.3 Intrication

L'intrication est un critère subjectif, l'évaluer demande donc de définir une valeur d'intrication. Dans cette sous-section nous proposons différentes valeurs possibles.

**Définition 2.2** Cellule d'un SMC Soit  $P \in M$  où  $M$  est un SMC. Alors on appelle  $\text{conv}(P)$  une cellule de  $M$ . De plus, soit  $p \in P$  et  $p' \in E$ . Alors  $p' \in \text{conv}(P)$  si et seulement si pour toute arête  $ab$  de  $\text{conv}(P)$  on a  $\text{sign}(abp) = \text{sign}(abp')$ .

**Définition 2.3** Décomposition d'un SMC en cellules imbriquées Soit  $P_1, P_2, \dots, P_r$  une décomposition de  $M$  tel que  $\text{conv}(P_r) \subseteq \text{conv}(P_{r-1}) \subseteq \dots \subseteq \text{conv}(P_1)$ . On appelle décomposition d'un SMC en cellules imbriquées une telle décomposition.

**Exemple 2.2** Soit  $M_1$  le SMC suivant :

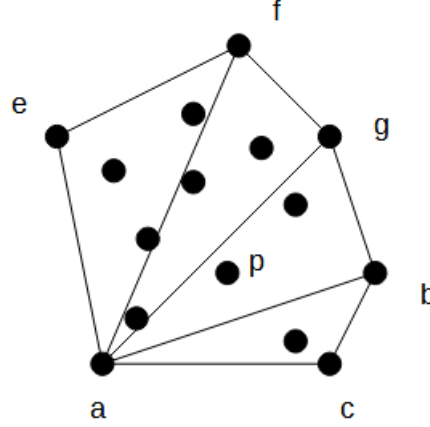


FIGURE 4 –  $M_1$  et une décomposition en cellules imbriquées.

Soit  $P_1 = \text{conv}(a, c, b, g, f, e)$ ,  $P_2 = \text{conv}(a, b, g, f, e)$ ,  $P_3 = \text{conv}(a, g, f, e)$  et  $P_4 = \text{conv}(a, f, e)$  alors  $P_1, P_2, P_3, P_4$  est une décomposition en cellules imbriquées de  $M_1$ . De plus,  $p' \in E$  est à l'intérieur de la cellule  $P_2$  si et seulement si pour toute arête  $xy$  du polytope associé à  $P_2$  on a  $\text{sign}(abp) = \text{sign}(abp')$ .

**Définition 2.4** *Décomposition en membrane* Soit  $M$  un SMC. Soit  $P_1 = \text{fr}(M)$  et  $P_i = \text{fr}(M - P_{i-1} - \dots - P_1)$  pour tout  $i$ . Alors les  $P_i$  sont appelés les membranes de  $M$  et la décomposition de  $M$  par ses membranes est une décomposition en cellules imbriquées.

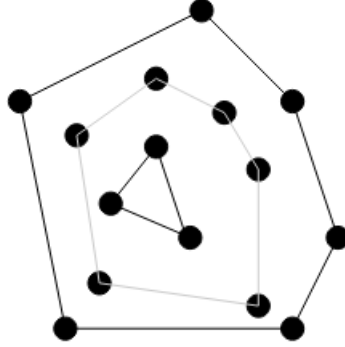


FIGURE 5 – Décomposition en membrane de  $M_1$ .

**Remarque 2.6** Chaque SMC a une décomposition par membrane unique.

**Proposition 2.4** *Mesure par nombre de points d'intrication* Soit  $M_1$  et  $M_2$  deux SMC et  $P_1, \dots, P_r, P'_1, \dots, P'_s$  des décompositions en cellules imbriquées de  $M_1$  et  $M_2$ . On mesure l'intrication entre  $M_1$  et  $M_2$  à partir du nombre de point de  $M_1$  dans les différentes cellules

de  $M_2$  et du nombre de point de  $M_2$  dans  $M_1$  tout en donnant plus de valeur aux points dans les cellules  $P_i$  avec  $i$  petit.

**Proposition 2.5** *Mesure par membrane d'intrication* Soit  $M_1$  et  $M_2$  deux SMC et  $P_1, \dots, P_r, P'_1, \dots, P'_s$  des décompositions en cellules imbriquées de  $M_1$  et  $M_2$ . On mesure l'intrication entre  $M_1$  et  $M_2$  à partir des plus petits  $i+j$  tels que  $\text{conv}(P_i) \cap \text{conv}(P_j) \neq \emptyset$ .

En fait, l'intrication peut se voir de deux manières : l'intrication de  $M_1$  dans  $M_2$  ou l'intrication de  $M_1$  et  $M_2$ . A priori, ces deux visions ne se mesurent pas de la même façon. La mesure faible d'intrication fait intervenir  $((\binom{P_1}{2} + \binom{P_2}{2} + \dots + \binom{P_r}{2})(P'_1 + P'_2 + \dots + P'_s)) + ((\binom{P'_1}{2} + \binom{P'_2}{2} + \dots + \binom{P'_s}{2})(P_1 + P_2 + \dots + P_r)$  triangles.

**Exemple 2.3** Soient  $M_1$  et  $M_2$  comme dans la figure ci-dessous.

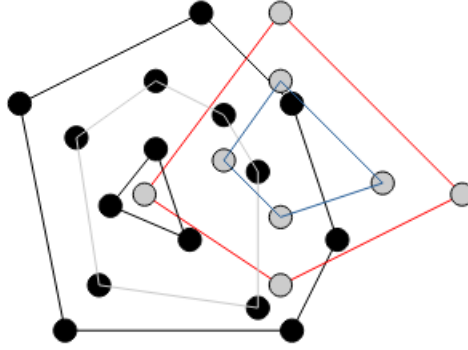


FIGURE 6 –  $M_1$  et  $M_2$  et leurs décompositions en membrane.

Alors d'après la première mesure d'intrication, dans  $M_1$ , on a 2 points de  $M_2$  dans la première membrane, 1 points dans la deuxième membrane et 1 point dans la troisième membrane. Dans  $M_2$  on a 2 points de  $M_1$  dans la première membrane et 2 dans la deuxième membrane.

Le deuxième critère d'intrication dit que la deuxième membrane de  $M_1$  intersecte la deuxième membrane de  $M_2$ .

## 2.4 Cocircuit d'un matroïde orienté

Dans tous ce qui précède, on utilise le sens d'un triangle formé à partir d'un segment et d'un point qui nous donne la position d'un point dans l'un ou l'autre des demi-plan formé par la droite qui passe par le segment choisis. En termes de matroïde orienté cela rejoint la notion de cocircuit d'un matroïde orienté.

Les cocircuits sont les circuits du dual du matroïde. (Les cocircuits sont en fait les complémentaires des hyperplans du matroïde)

**Définition 2.5** *Circuits (et cocircuits) signés* Soit  $\mathcal{C}$  un ensemble de partie signées de  $E=1 : n$ . Alors  $\mathcal{C}$  est un ensemble des circuits des matroïde orienté si et seulement si :

- (C1)  $\emptyset \notin \mathcal{C}$   
(C2)  $\forall C \in \mathcal{C}, -C \in \mathcal{C}$   
(C3)  $\forall C, C' \in \mathbf{C}^2$ , si  $C' \subseteq C$  alors  $C' = C$ .  
(C4)  $\forall C, C' \in \mathcal{C}, C \neq C', e \in C^+ \cap C'^-$  et  $f \in (C^+ - C'^-) + (C^- + C'^+)$ , il existe  $C'' \in \mathcal{C}$  tel que  $C''^+ \subseteq (C^+ \cap C'^+) - e$ ,  $C''^- \subseteq (C^- \cap C'^-)$  et  $f \in C''$ .

Sans les signes,  $\underline{\mathcal{C}}$  est appelé le support de  $C \in \mathcal{C}$ . Les supports des circuits orientés définissent les circuits d'un matroïde non orienté.

**Remarque 2.7** Sans les signes, dans les graphes, les circuits sont les cycles du graphe, dans les familles de vecteurs les circuits sont les dépendants minimaux etc...

Dans notre cas, nous nous intéressons aux cocircuits associés au matroïde orienté d'une configuration de points dans un espace affines. Les ensembles de points qui engendrent un hyperplan et sont maximaux pour cette propriété sont les complémentaires des cocircuits. En dimension 3, étant donné un segment  $ab$ , les points qui ne sont pas dans la droite  $ab$  forment donc un cocircuit et le signe de chacun de ses éléments dépend de quel côté de la droite ils se trouvent.

En fait, lorsque l'on parlait de prendre un point  $p$  et un segment  $ab$  dans  $M_1$  et un point  $p'$  dans  $M_2$  et de regarder si  $\text{sign}(abp) = \text{sign}(abp')$  on regardait en fait si  $p$  et  $p'$  était du même côté par rapport à la droite engendré par  $ab$ .

**Remarque 2.8** Dans le problème de trouver les SMC les plus significatifs pour choisir nos recouvrements, une possibilité est aussi de minimiser le nombre de  $d$ -uplets pour calculer les propriétés qui nous intéressent (par exemple pour l'intersection il faut minimiser le nombre de sommet de chaque polytope, pour l'intrication il faut minimiser le nombre de sommet de chaque cellule)

**Proposition 2.6** Soit  $P$  un ensemble de points. Les cocircuits positifs (càd dont tous les signes sont  $+$ ) nous donnent les facettes (arêtes ou sommet en dimension 2) du polytope convexe. En effet, soit  $H$  le complémentaire d'un tel cocircuit, alors tous les points de  $P$  sont du même côté de  $H$ . Comme  $H$  engendre un hyperplan alors  $H$  est contenu dans une face du polytope.

### 3 Partie Algorithmique

Un autre but de ce stage est d'implémenter ces définitions abstraites sur le logiciel OM-SMO, cela demande en plus de réfléchir à une vision algorithmique de ces définitions. Plus particulièrement, l'information principale que l'on utilise est  $\mathcal{X}_{\mathcal{M}}$  càd les signes des  $d$ -uplets. En fait on cherche à utiliser le moins possible de ces  $d$ -uplets.

Cette section est donc une proposition de point de vu que l'on peut prendre dans le but de programmer les critères d'interactions entre deux SMC.

**Proposition 3.1** Soient  $M_1$  un SMC de  $E$  et  $p \in E - M_1$ . Soit  $\text{conv}(P)$  une cellule de  $M_1$  et soit une ordonnance  $e_1, e_2, \dots, e_r$  des arêtes de  $\text{fr}(P)$ . Alors il existe une suite de signe  $s_1, s_2, \dots, s_r$  ( $+$ ,  $-$ ) tel que  $p \in \text{conv}(P)$  si et seulement si  $\text{sign}(e_1, p) = s_1, \text{sign}(e_2, p) = s_2, \dots, \text{sign}(e_r, p) = s_r$ . On propose d'appeler coordonnées relatives à  $e_1, e_2, \dots, e_r$  la suite de signe  $s_1, s_2, \dots, s_r$ .



**Remarque 3.1** *En connaissant  $\mathcal{X}_{\mathcal{M}}$  et les coordonnées relatives aux arêtes de  $M_1$  (dans n'importe quel ordre) alors pour savoir si un point  $p \in E$  est dans  $\text{conv}(M_1)$  il suffit alors de regarder le signe des triangles correspondants.*

**Remarque 3.2** *D'un point de vue abstrait on utilisait un point de référence pour avoir les signes des coordonnées relatives aux arêtes d'un SMC. D'un point de vu pratique, on peut enregistrer cette suite de signe pour chaque SMC. Tout dépend de si on calcul le signe des d-uplets en pré-traitement ou non.*

**Remarque 3.3** *Tout ce qui précède est toujours vrai si l'on remplace "SMC" par "cellule d'un SMC". Cela vient du fait que les cellules sont aussi des SMC. Donc pour mesurer l'intrication de deux sous-modèles, on peut enregistrer les coordonnées relatives aux arêtes des cellules imbriquées.*

### 3.1 Vision "moteur d'application"

Une façon de réfléchir est d'adopter le point de vue des moteurs d'application. Dans l'optique idéal, on souhaiterait calculer une partie de  $\mathcal{X}_{\mathcal{M}}$  à chaque frame de l'application. Cette partie serait la plus petite possible. D'abord on retirerait tous les d-uplets contenus dans un SMC. Ensuite, on définirai un certain nombre d'application et un ordre d'apparition de ces applications. Par exemple, supposons que l'on ait dans notre scène deux SMC  $M_1$  et  $M_2$ . Pour une raison quelconque, à une certaine frame de l'application on décide qu'il faut regarder si les deux SMC s'intersectent. On va alors actualiser la liste des d-uplets à calculer. Tant qu'il n'y à pas d'intersections, et si on continu de croire qu'il peut y en avoir une alors on garde cette liste de d-uplet. S'il y a une intersection, on peut demandé de mesurer l'intrication entre les deux modèles. On pourrait alors actualiser la liste des d-uplets à calculer et rajouter ceux qui concernent l'intersection des premières membranes, puis des deuxièmes et ainsi de suite...Ainsi, toutes les informations seraient calculés à chaque frame et les différentes fonctions du moteur seraient juste de déterminer quels sont les informations dont on aura besoin à la frame suivante.

Un tel moteur pourrait être très efficace si chaque d-uplet que l'on calcule peut servir à plusieurs fonctions. Ainsi la liste des d-uplets calculé serait toujours minimale par rapport aux informations nécessaires tout en donnant énormément d'informations.

#### 3.1.1 Notion de position

Pour nous, la notion de position à peu d'importance. Néanmoins, nous pouvons artificiellement créer une grille en rajoutant des points "fictifs", tels que l'ensemble des signes des triangles que forme un point avec toutes les droites de cette grille nous donne la position du point dans la grille. De cette manière nous pouvons toujours, théoriquement, passer des relations du matroïdes (avec les points fictifs) aux positions des points dans l'espace affine. Cette astuce donne aussi lieu à la possibilité d'utiliser des structures de données comme des grilles, des kd-tree, des octree etc...

Cette notion de "points fictifs" peut largement être utilisé et développé dans le cas pratique, par exemple on pourrait rajouter des centres aux SMC. Cela pourrait donner par exemple une piste sur les réponses physique liées aux interactions via des notions d'angles...Mais ce n'est pas le but actuel du sujet.

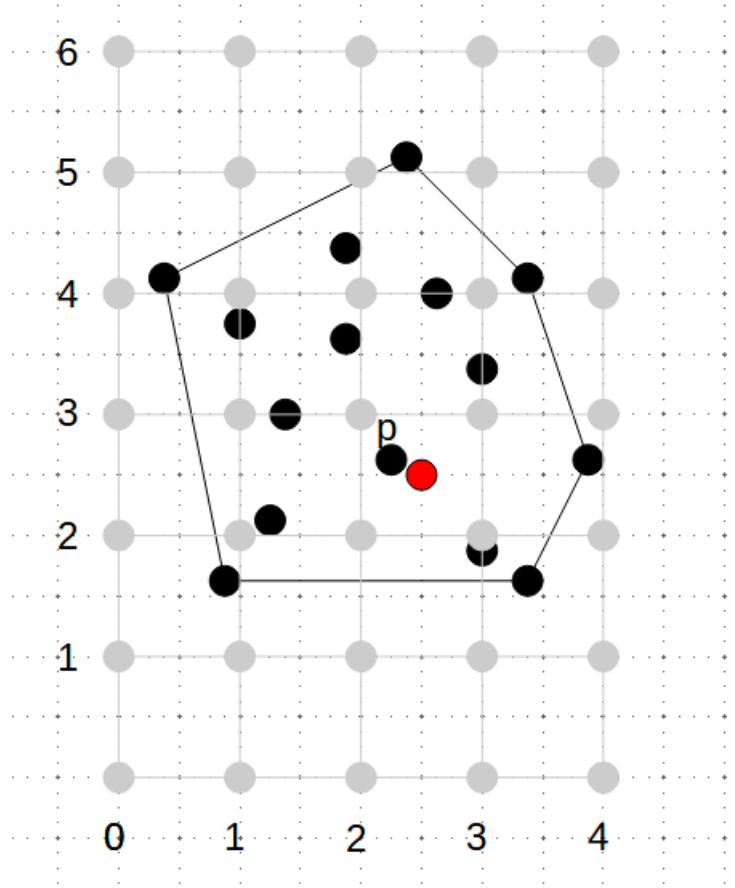


FIGURE 7 – Si on suppose que la grille grise est un SMC  $M_2$ , alors on peut dire que  $p \in M_1$  est dans la cellule de coordonnée  $[2,3] \times [2,3]$  car pour toute arête  $ab$  de cette cellule,  $\text{sign}(abp) = \text{sign}(abp')$  où  $p'$  est le point rouge. En donnant un ordre pour chacune des droites ainsi qu'une orientation des demi-plan alors on pourrait donner un système de coordonnées par signe de ces cellules.

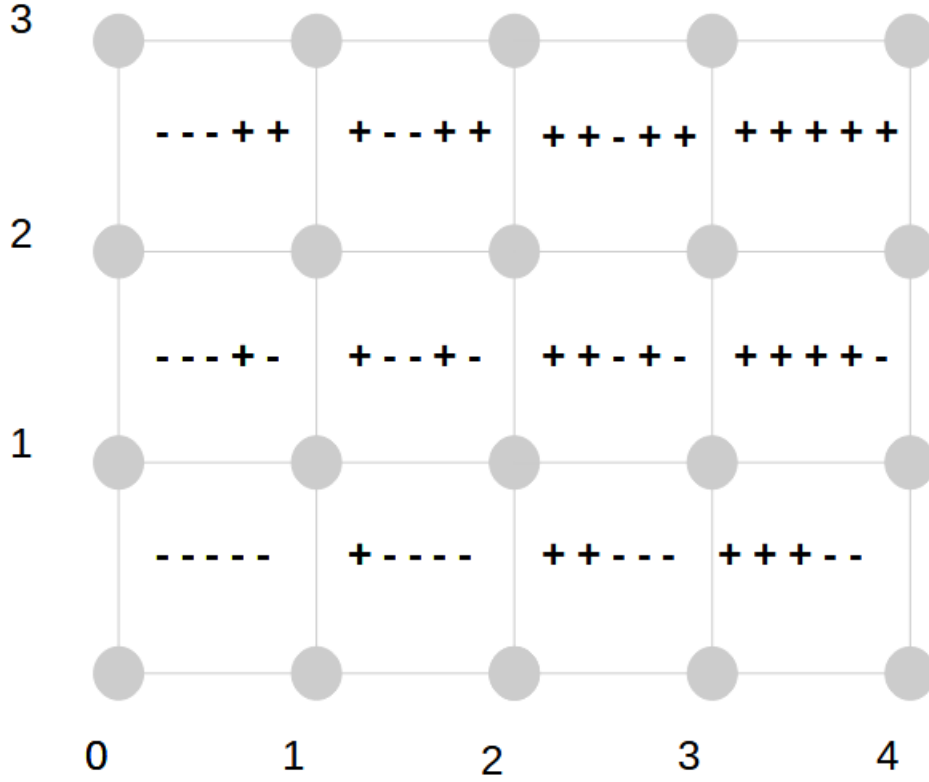


FIGURE 8 – Prenons le SMC  $M_2$  composé des points de la grille grise ici. En donnant l'ordre des droites suivant : d'abord les droites  $x=1, x=2, x=3$  puis les droites  $y=1, y=2$  avec l'orientation des demi-plans suivants : si on est à gauche d'une droite verticale on est alors -, si on est à droite +, si on est en dessous d'une droite horizontale on est - et au dessus +. Alors on a le système de coordonnées de cette figure.

### 3.1.2 Notion de rotation

Cette notion sera développée dans la prochaine section.

### 3.1.3 D'autre notion

D'autre notion on sûrement une définition en termes d'orientation de d-uplet, notamment la liste suivante : être plus grand que, être une réflexion de, être à l'intérieur de, être homomorphe à, être "à gauche" de (ou n'importe quelle direction)...Même des notions tels que "être proche de" peuvent avoir un sens en rajoutant des points fictifs.

### 3.1.4 Réflexion personnelle

Pour moi, ces réflexions à base de matroïdes sont en fait des réflexions sur une géométrie référentielle. En effet, à chaque fois que l'on veut mesurer une valeur, on le fait en prenant un objet de référence et en évaluant une propriété d'un (ou plusieurs) objets dans son référentiel. Les derniers commentaires avec des "points fictifs", des grilles et même des repères ortho-normés mènent à croire que l'on peut toujours mesurer une propriété de géométrie affine (discrète) avec les matroïdes orientés : il suffit de créer un ensemble de point fictifs qui correspond à l'espace affine. Les matroïdes étendraient donc ces notions en permettant de donner

n'importe quel matroïde sous jacent comme référentiel.

## 4 En dimension 3 (d=4)

### 4.1 Rotation

Comme dit dans la section 1, une grande partie des résultats précédents en deux dimensions fonctionnent toujours en trois dimension. Il suffit dans ce cas de remplacer toutes les occurrences des mots "triangle" par "tétraèdre" et "arête" par "face". Les intersections et l'intrication entre deux SMC fonctionnent donc de la même manière. Cependant, en dimension 3 on a un deuxième type de d-uplets. Ces d-uplets sont ceux qui ont exactement deux points dans chaque SMC. On propose ici d'étudier les liens entre la rotation de  $M_2$  par rapport à  $M_1$  et les changements de signes de ces 4-uplets.

**Proposition 4.1** *Soit  $e_1 \in M_1^2$  et  $e_2 \in M_2^2$ . On dira que  $e_1$  est "fixe" pour dire que l'on se place dans le référentiel de  $M_1$ . Alors  $\text{sign}(e_1, e_2)$  est le signe de la rotation de  $e_2$  par rapport à  $e_1$ .*

*En fait, en posant  $e_2 = ab$  avec  $a, b \in M_2$  alors il s'agit de regarder la position de  $b$  par rapport au plan  $e_1 a$ . (ou la position de  $a$  par rapport au plan  $e_1 b$ ).*

**Remarque 4.1** *Étant donné  $e_1$  fixe, deux modèles  $M$  et  $M' \in \mathcal{M}$  (rappel : modèles = configuration de points,  $SM$  = ensemble de points) et  $\mathcal{X}_M, \mathcal{X}_{M'}$  les signes des 4-uplets dans ces modèles. On peut mesurer la rotation par rapport à l'axe engendré par  $e_1$  de  $M$  à  $M'$  par le nombre de changements de signe des tétraèdres du type  $e_1, e_2$  où  $e_2 \in M_2^2$ .*

**Proposition 4.2** *(repère de rotation) Soit  $M_1, M_2$  deux SMC et soit  $R = ab, ac, ad \in M_1^4$  un tétraèdre tel que  $\text{sign}(R) = +$ . Alors les signes de tous  $e_2 \in M_2^2$  par rapport à  $ab, ac$  et  $ad$  donne la rotation de  $M_2$  dans le référentiel  $R$ .*

*On a choisit ici de prendre  $R$  dans  $M_1$  mais on pourrait très bien prendre  $R$  dans  $E$ . Voir rajouter le simplexe unitaire (tétraèdre de côté de taille 1 centré en 0) comme repère pour tous les SMC.*