

La théorie des nœuds via le polynôme d'Alexander

Fathi Ben Aribi

M2 Mathématiques Fondamentales, IMJ-PRG, Cours spécialisé, Mars-Avril
2026

TABLE DES MATIÈRES

1. Nœuds, entrelacs, et Définition A	4
1.1. La sphère $\mathbb{S}^3$	4
1.2. Nœuds et entrelacs	5
Le polynôme d'Alexander des nœuds	7
1.3. Diagrammes	10
Nombre et matrice d'enlacement d'un entrelacs (pas vu en Séance 1, mais en Séance 4)	16
Morceaux choisis de l'histoire de la théorie des nœuds (pas vu en séance 1)	18
1.4. La Définition A d'Alexander	19
Régions et colonnes (pas vu en séance 1, mais en séance 3)	21
Preuve de l'invariance	23
Nœuds toriques $T(2, q)$ (pas vu en séance 1, mais en séance 2)	24
1.5. Exercices Séance 1 (4 mars 2026) : Nœuds, entrelacs et Définition A	25
1.6. Solutions des exercices	27
2. Relations skein et Définition X	36
2.1. Lire une table de nœuds	36
2.2. Somme connexe de nœuds	37
2.3. Le nombre de dénouement	38
2.4. Triplets skein	39
2.5. Polynôme de Conway et Définition X	40
2.6. Polynôme de Jones et nombre de croisements	42
2.7. Le polynôme HOMFLY-PT à 2 variables	43
2.8. Exercices Séance 2 (6 mars 2026) : Relations skein et Définition X	44
2.9. Solutions des exercices	45
3. Grilles et Définition M	47
3.1. Diagrammes en grille	47
3.2. Indices de régions	49
3.3. Matrice du démineur et Définition M	50
3.4. Homologie en grille et catégorification (pas au programme de l'examen)	52
3.5. Exercices Séance 3 (11 mars 2026) : Grilles et Définition M	53
3.6. Corrections des exercices	54
4. Surfaces de Seifert et Définition S	56
4.1. Nombre d'enlacement (vu en séance 4, voir section 1.3bis ci-dessus)	56
Préliminaires sur les CW-complexes	56
Préliminaires sur les surfaces (orientables)	56
Préliminaires sur l'orientation	58
4.2. Surface de Seifert et genre d'un entrelacs	58
Équivalence de surfaces (pas vu en cours)	61
4.3. Forme et matrice de Seifert	62
4.4. Signature	63
4.5. Polynôme d'Alexander, Définition S	64
Étude de deux exemples	65
4.6. Exercices Séance 4 (13 mars 2026) : Surfaces de Seifert et Définition S	67

4.7. Corrections des exercices	72
5. Extérieurs, groupes et Définition G	76
5.1. Extérieurs d'entrelacs	76
5.2. Propriétés des extérieurs	76
5.3. Le groupe d'un entrelacs	77
5.4. Matrice de présentation d'un module	79
5.5. Définition G	80
6. Modules d'Alexander	81
6.1. Revêtements et groupes	81
6.2. Module d'Alexander d'un nœud	81
6.3. Le revêtement infini cyclique via une surface de Seifert	82
6.4. Cas des entrelacs, cas univarié	83
6.5. Cas des entrelacs, cas multivarié	84
6.6. Exercices Séance 6 (20 mars 2026) : Revêtements, modules d'Alexander et Définitions C	86
6.7. Solutions des exercices	87
Références	90

**Objectifs du Cours Spécialisé "La théorie des nœuds via le polynôme d'Alexander",
M2 Maths Fondamentales IMJ-PRG, Mars-Avril 2026, par Fathi Ben Aribi.**

La liste suivante pourra être modifiée en fonction de l'avancement du cours, mais les savoirs et compétences visés à être évalués seront au préalable travaillés pendant les séances de cours.

Le cours en classe, les notes de cours et les feuilles d'exercices seront en **français**. Les notes de cours seront disponibles sur la page web
<https://www.normalesup.org/~benaribi/>

Matériel suggéré : Papier pour Brouillon, cahier d'exemples, papier pour des notes rédigées, stylos/crayons/feutres de couleur, ciseaux, scotch, matériel de géométrie, ficelles.

Évaluation : Vendredi 17 avril, 09h-12h, Jussieu salle 15-16-101.

L'examen pourra être fait en français ou en anglais (avec sujet en anglais).

La **rédaction** sera fortement évaluée (perte de points par erreur de rédaction).

Pour s'entraîner, des exercices non-notés facultatifs seront donnés à chaque séance.

Prérequis : Algèbre commutative de niveau licence (groupes, anneaux, algèbres, modules). De préférence, bases de la topologie algébrique : groupe fondamental, revêtements, complexes de chaînes, homologie, éventuellement CW-complexes (on fera de brefs rappels dessus, mais c'est mieux d'avoir déjà rencontré ces concepts). Il est ainsi recommandé d'avoir suivi les cours « Topologie algébrique des variétés I » et/ou « Homotopie I ».

Savoirs mathématiques attendus pour l'examen : Connaître les contenus abordés pendant les séances de cours. Notamment les diverses définitions du polynôme d'Alexander, et des autres invariants d'entrelacs, ainsi que leurs propriétés, etc. Les preuves non abordées ou non détaillées en cours ne sont pas censées être exigibles à l'examen, sauf si elles sont similaires à des contenus vus en cours.

Savoir-faire attendus pour l'examen :

- Rédiger correctement un raisonnement mathématique (bon usage des langages français et mathématique, des quantificateurs, bonne définition des variables...)
- Dessiner des objets topologiques (nœuds, entrelacs, suite de mouvements de Reidemeister, courbes, surfaces, 3-variétés, etc.). Savoir utiliser des couleurs.
- Trouver des exemples ou contre-exemples (notamment des nœuds et entrelacs).
- Résoudre un exercice similaire à ceux faits en feuilles d'exercices

Calendrier des séances (sujet à modification) :

- (1) Séance 1 (4 mars) Nœuds, entrelacs, Définition A
- (2) Séance 2 (6 mars) Relations skein, Définition X, polynôme de Jones
- (3) Séance 3 (11 mars) Diagrammes en grille, Définition M
- (4) Séance 4 (**le 13 mars 14h-16h**) Surfaces de Seifert, Définition S
- (5) Séance 5 (18 mars) Extérieur, Groupe, Définition G
- (6) Séance 6 (20 mars) Modules, Revêtements, Définition C
- (7) Séance 7 (25 mars) Calcul de Fox, Définition F
- (8) Séance 8 (27 mars) Présentation de Wirtinger, Définition FW
- (9) Séance 9 (1er avril) Satellites, Définition RF
- (10) Séance 10 (3 avril) Groupes de tresses, Définition B
- (11) Séance 11 (8 avril) Torsions de Reidemeister, Définition T
- (12) Séance 12 (10 avril) Triangulations, Définition NZ

1. NŒUDS, ENTRELACS, ET DÉFINITION A

Dans ce chapitre, nous passerons en revue les concepts fondamentaux de la théorie des nœuds, et nous introduirons de premiers invariants de nœuds simples d'approche.

1.1. **La sphère $\mathbb{S}^3$.** On considèrera la plupart du temps des entrelacs plongés dans la sphère de dimension 3 (notée $\mathbb{S}^3$), parfois dans l'espace tri-dimensionnel $\mathbb{R}^3$, et plus rarement comme plongés dans la boule de dimension 3 (notée $\mathbb{B}^3$). Commençons par rappeler des définitions équivalentes de $\mathbb{S}^3$ (chacune ayant son intérêt), avant d'expliquer les nuances entre la considération de $\mathbb{S}^3$, $\mathbb{R}^3$ ou $\mathbb{B}^3$ comme espace ambiant.

Pour mieux visualiser $\mathbb{S}^3$, on peut ré-interpréter chacune de ces définitions en dimension inférieure, avec $\mathbb{S}^2$ ou $\mathbb{S}^1$, et en s'aidant de dessins, comme les Figures 1 et 2.

Définition 1.1. La β -sphère $\mathbb{S}^3$ est définie par n'importe laquelle des définitions suivantes équivalentes :

- (a) La sphère unité de $\mathbb{R}^4$:

$$\mathbb{S}^3 = \{(x, y, z, t) \in \mathbb{R}^4 \mid x^2 + y^2 + z^2 + t^2 = 1\}.$$

- (b) Le compactifié d'Alexandrov de $\mathbb{R}^3$ (par ajout d'un point noté ∞) :

$$\mathbb{S}^3 = \mathbb{R}^3 \cup \{\infty\}.$$

Dans l'image habituelle que l'on se fait de $\mathbb{R}^3$, le même unique point ∞ est atteint comme limite de toute suite de points dont la norme dans $\mathbb{R}^3$ tend vers l'infini.



FIGURE 1. $\mathbb{S}^2$ est le compactifié de $\mathbb{R}^2$

- (c) L'union de deux boules $\mathbb{B}^3$ recollées le long de leur bord $\mathbb{S}^2$:

$$\mathbb{S}^3 = \mathbb{B}^3 \cup_{\mathbb{S}^2} \mathbb{B}^3.$$

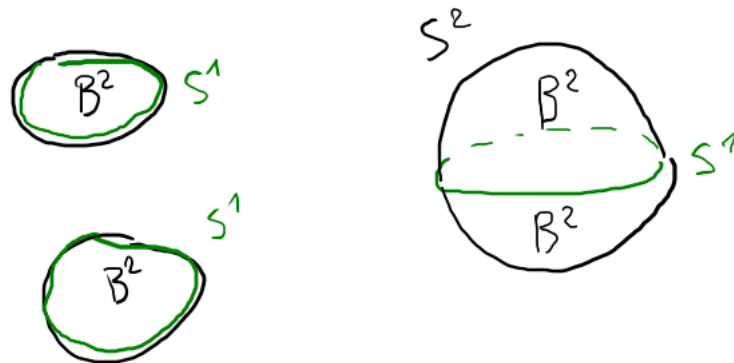


FIGURE 2. $\mathbb{S}^2$ est le recollement de deux disques $\mathbb{B}^2$

Précisons maintenant quelques nuances entre $\mathbb{S}^3$, $\mathbb{R}^3$ et $\mathbb{B}^3$:

- L'espace $\mathbb{S}^3$ est compact, ce qui a toujours ses avantages. Il admet notamment une structure de CW-complexe avec un nombre *fini* de cellules.
- L'espace $\mathbb{R}^3$ n'est pas compact, mais est un espace auquel nous sommes bien habitués, et il est plus facile à visualiser que $\mathbb{S}^3$.
- L'espace $\mathbb{B}^3$ (la boule unité *fermée*) est compact et facile à visualiser, mais a un bord.

Exercice (Exercice 1.A). (1) *Montrer que $\mathbb{B}^3$ et $\mathbb{R}^3$ sont homotopiquement équivalents mais pas homéomorphes.*

(2) *Montrer que $\mathbb{B}^3$ et $\mathbb{S}^3$ ne sont pas homotopiquement équivalents.*

Pour le reste de cet ouvrage, on choisit une orientation de $\mathbb{S}^3$, par exemple celle venant de la règle de la main droite dans $\mathbb{R}^3$.

1.2. Nœuds et entrelacs.

Définition 1.2. Soit $m \in \mathbb{N}^*$. Un *entrelacs* L à m composantes est une sous-variété orientée (lisse) de $\mathbb{S}^3$ difféomorphe à une union disjointe de m cercles $\mathbb{S}^1$ (orientés).

Un *nœud* est un entrelacs à une composante, i.e. une courbe fermée simple lisse orientée dans $\mathbb{S}^3$.

On pourra dès maintenant consulter des premiers exemples d'entrelacs sur la Figure 3.

Exemple 1.3. Le cercle unité $\mathbb{S}^1 \subset \mathbb{R}^2 \subset \mathbb{R}^3 \subset \mathbb{S}^3$, muni d'une de ses deux orientations, est appelé le *nœud trivial* (*unknot* en anglais) et est noté U , O ou 0_1 .

L'union de n cercles unité orientés appartenant chacun à un plan horizontal d'altitude différente est appelé *entrelacs trivial à n composantes*.

Définition 1.4. Soient S, T deux sous-variétés d'une variété M (toutes trois orientées). Une *isotopie ambiante* (lisse) entre S et T est une application lisse $F: [0, 1] \times M \rightarrow M$ telle que

- $F(0, \cdot): M \rightarrow M$ est l'identité de M ,
- Pour tout $t \in [0, 1]$, $F(t, \cdot): M \rightarrow M$ est un difféomorphisme de M respectant l'orientation,
- $F(1, S) = T$.

Définition 1.5. Deux entrelacs L, L' de $\mathbb{S}^3$ sont *équivalents* (ou *ambient-isotopes*) s'ils vérifient les conditions suivantes équivalentes :

- il existe une isotopie ambiante entre L et L' en tant que sous-variétés de $\mathbb{S}^3$.
- il existe un auto- (C^∞) -difféomorphisme $h: \mathbb{S}^3 \rightarrow \mathbb{S}^3$ respectant l'orientation tel que $h(L) = L'$.

L'équivalence entre ces deux définitions sera admise (et n'est pas immédiate!). On pourra consulter par exemple [BZ, Proposition 1.8] pour en savoir plus.

On notera parfois $[L]$ la classe d'équivalence de L (appelée aussi *classe d'isotopie*).

Exercice (Exercice 1.B). Prenons J le nœud trivial donné par un cercle unité orienté, et K le cercle muni de l'orientation inverse.

- (1) *Montrez qu'il existe une isométrie de $\mathbb{R}^3$ respectant l'orientation et envoyant J sur K (on pourra utiliser des rotations et translations).*
- (2) *En déduire que J et K sont équivalents.*

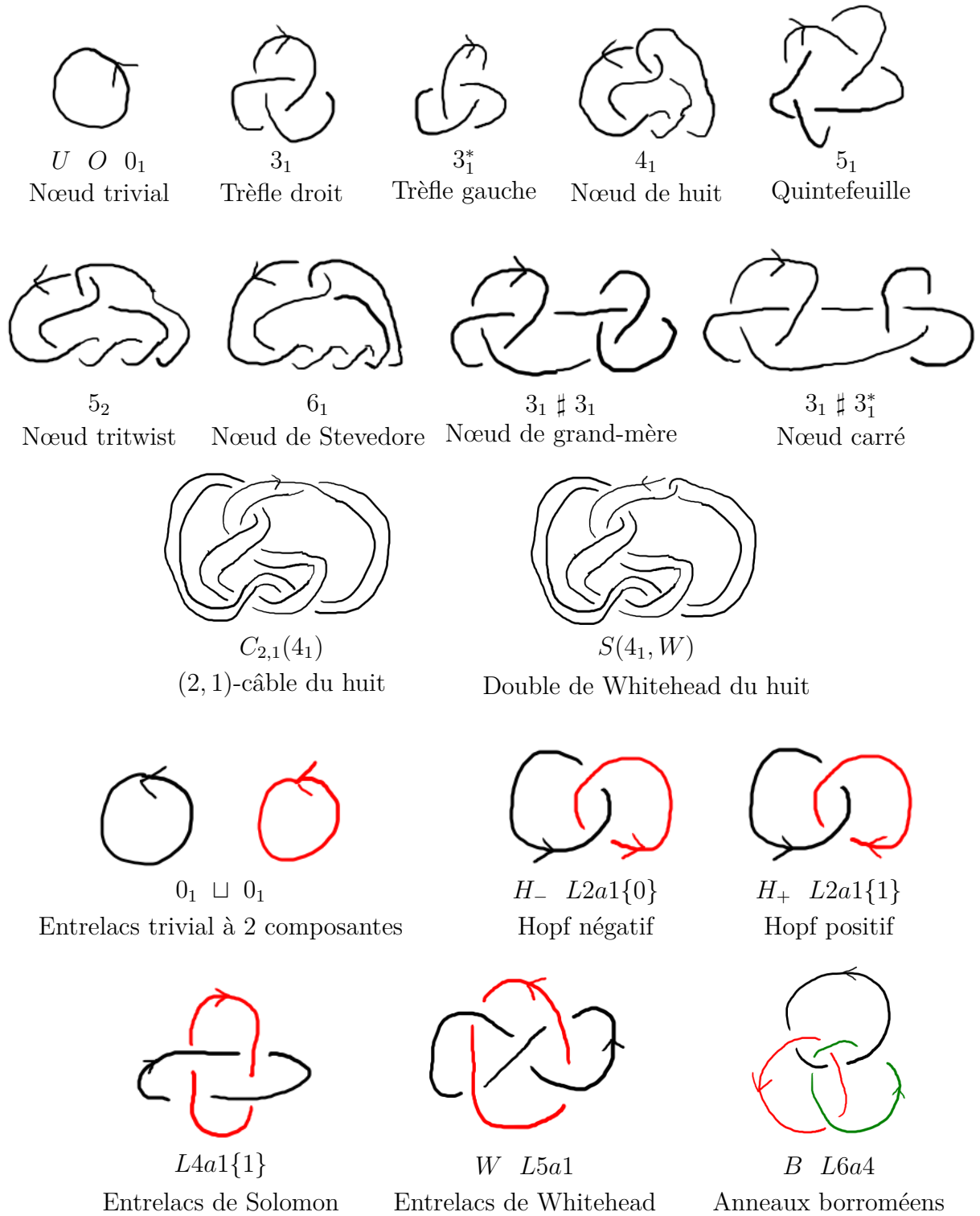


FIGURE 3. Notations et noms de quelques nœuds et entrelacs

Définition 1.6. Soit K un nœud. On note $-K$ le *nœud inverse* de K , obtenu depuis K en inversant le sens de parcours.

Un nœud K est *inversible* s'il est équivalent à son inverse.

L'Exercice 1.2 consiste donc à prouver que le nœud trivial est inversible. Remarquons tout de suite qu'il est difficile de trouver des exemples de nœuds non inversibles.

Les Définitions 1.2 et 1.5 ne sont pas les seules façons utilisées dans la littérature pour définir les notions d'*entrelacs* et d'*équivalence d'entrelacs*.

On peut également définir un entrelacs comme un *plongement* d'une union disjointe de cercles (là où la Définition 1.2 décrit plutôt l'image d'un tel plongement), ou comme une union de courbes *polygonales* fermées simples (aussi appelé entrelacs *PL* ou *Piecewise-Linear*). On pourra consulter [BZ, Chapter 1] pour plus de détails sur ces définitions alternatives.

Comme ce cours donne la priorité à l'exploration en largeur plutôt qu'en profondeur, nous nous contenterons des Définitions 1.2 et 1.5, mais surtout de la compréhension intuitive qu'un nœud est une ficelle parcourant une trajectoire dans l'espace sans auto-intersection et revenant à son point de départ, et l'équivalence correspond à déplacer la ficelle de manière lisse sans l'autoriser à se traverser elle-même.

Le but de la théorie des nœuds est de classer les nœuds et entrelacs à équivalence près, ce qui permet de les classer dans des tables comme celle de la Figure 3. Pour ce faire, on utilise des *invariants* :

Définition 1.7. Un *invariant d'entrelacs* est une application dont l'ensemble de départ est l'ensemble des entrelacs et qui prend la même valeur sur des entrelacs équivalents.

Ainsi, si F est un invariant d'entrelacs et si L, L' sont des entrelacs tels que $F(L) \neq F(L')$, alors par contraposée L et L' ne sont pas équivalents, et sont donc *distingués par F* .

En général, *calculer* ou *comparer* $F(L)$ et $F(L')$ peut ne pas être évident, notamment selon l'ensemble d'arrivée de F .

Exemple 1.8. La classe d'équivalence $[L]$ de l'entrelacs L est un invariant, par conséquence immédiate des définitions. C'est l'invariant le plus puissant possible mais le moins pratique à comparer pour différencier des entrelacs.

Exemple 1.9. À l'inverse, associer 0 à tout entrelacs donne un invariant très facile à calculer et à comparer, mais a un pouvoir de détection nul.

Exemple 1.10. Un peu mieux qu'un invariant constant, il y a le *nombre de composantes* $\mu(L)$ d'un entrelacs $L = L_1 \cup \dots \cup L_{\mu(L)}$.

Exemple 1.11. L'ensemble (fini) des classes d'isotopies des nœuds composant l'entrelacs

$$L = L_1 \cup \dots \cup L_{\mu(L)} \mapsto \{[L_i] \mid 1 \leq i \leq \mu(L)\}$$

est un invariant d'entrelacs.

Pour accéder aux valeurs de nombreux invariants de nœuds et d'entrelacs, on pourra consulter les sites web *Knotinfo* et *Linkinfo*. La Figure 4 montre un exemple de telle recherche de plusieurs invariants en simultané.

Tous les invariants d'entrelacs abordés dans ce cours sont recensés dans le tableau de la Figure 5, avec la référence de sa première définition. Seul le polynôme d'Alexander, vedette de cet ouvrage, est absent du tableau de la Figure 5, car il a son propre tableau plus détaillé dans la Figure 7.

Le polynôme d'Alexander des nœuds. Présentons maintenant l'objet central de ce cours, à savoir le polynôme d'Alexander d'un nœud. Cet invariant de nœuds sera notre guide, notre point d'ancrage, tout au long de notre exploration de différentes régions de la théorie des nœuds.

Remarquons tout de suite que nous le désignons ici comme invariant de *nœuds*, pas d'entrelacs, car s'il se généralise aux entrelacs, il peut le faire de plusieurs manières, comme nous le découvrirons dans les prochains chapitres.

Le polynôme d'Alexander d'un nœud K est noté Δ_K ou $\Delta_K(t)$, et vit dans l'anneau $\mathbb{Z}[t, t^{-1}]$ des polynômes de Laurent à coefficients entiers (t étant ici l'indéterminée).

KnotInfo: Table of Knots Search Results				
Export to CSV				
Name	Fibered	Genus	Alexander	Volume
<u>3_1</u>	Y	1	$1-t+t^2$	0
<u>4_1</u>	Y	1	$1-3t+t^2$	2.029883213
<u>5_1</u>	Y	2	$1-t+t^2-t^3+t^4$	0
<u>5_2</u>	N	1	$2-3t+2t^2$	2.828122088
<u>6_1</u>	N	1	$2-5t+2t^2$	3.163963229
<u>6_2</u>	Y	2	$1-3t+3t^2-3t^3+t^4$	4.400832516
<u>6_3</u>	Y	2	$1-3t+5t^2-3t^3+t^4$	5.693021091
<u>7_1</u>	Y	3	$1-t+t^2-t^3+t^4-t^5+t^6$	0
<u>7_2</u>	N	1	$3-5t+3t^2$	3.331744232
<u>7_3</u>	N	2	$2-3t+3t^2-3t^3+2t^4$	4.592125697
<u>7_4</u>	N	1	$4-7t+4t^2$	5.137941202
<u>7_5</u>	N	2	$2-4t+5t^2-4t^3+2t^4$	6.443537381
<u>7_6</u>	Y	2	$1-5t+7t^2-5t^3+t^4$	7.084925954
<u>7_7</u>	Y	2	$1-5t+9t^2-5t^3+t^4$	7.643375172
<u>8_1</u>	N	1	$3-7t+3t^2$	3.427205246

FIGURE 4. Le site web KnotInfo

Notation	Nom	Référence
$[L]$	Classe d'équivalence	1.8
$\mu(L)$	Nombre de composantes	1.10
$\{[L_i]\}_i$	Classes des composantes	1.11
$\text{lk}(L)$	Nombre d'enlacement	1.20
$\text{Lk}(L)$	Matrice d'enlacement	1.22
$c(L)$	Nombre de croisements	2.1
$K = -K ?$	Inversibilité	1.6
$K = K^* ?$	Être amphichéral	4.9, 4.28
	Type de symétrie	4.28
	Nombre de facteurs premiers	2.8
	Être alterné	2.2
	Être scindé	2.3
$g(L)$	Genre	4.10
$\sigma(L)$	Signature	4.31
$\det(L)$	Déterminant	4.35
$u(K)$	Nombre de dénouement	2.10
$\nabla_L(z)$	Polynôme de Conway	2.24
$J_L(t)$	Polynôme de Jones	2.29
$P_L(v, z)$	Polynôme HOMFLY-PT	2.35
E_L	Extérieur	5.1
G_L	Groupe	5.8
$(G_K, [m_K], [l_K])$	Système périphérique	??
$\mathcal{A}_K$	Module d'Alexander	6.3
$\mathcal{A}_L^{\mathbb{Z}}$	Module d'Alexander univarié	6.12
$\mathcal{A}_L^{\mu}$	Module d'Alexander multivarié	6.16
$b(L)$	Indice de tressage	??

FIGURE 5. Index des définitions d'invariants d'entrelacs

Ci-après dans la Figure 6 sont listées ses valeurs pour quelques nœuds simples, dans le but de vous familiariser avec cet objet.

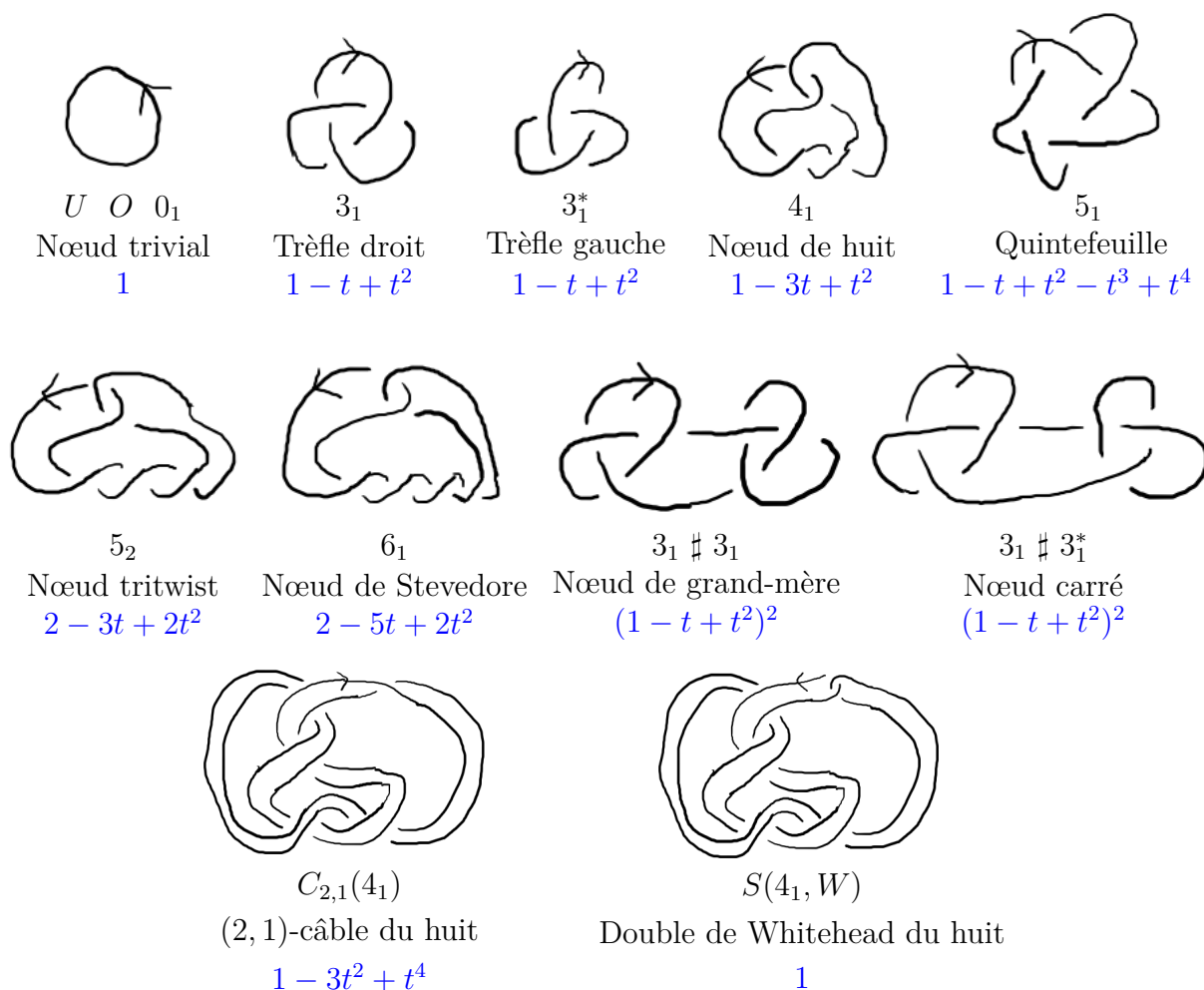


FIGURE 6. Premières valeurs du polynôme d'Alexander $\Delta_K(t)$ (en bleu)

Dans ce cours nous aborderons les définitions suivantes du polynôme d'Alexander, liées à différents types d'objets :

- comme déterminant d'une matrice construite depuis le diagramme,
- via une relation d'écheveaux (*skein relation*),
- via des représentations de groupes de tresses,
- via une surface de Seifert,
- via l'homologie d'un revêtement,
- via le calcul de Fox sur le groupe libre,
- comme une torsion de Reidemeister.

Plusieurs de ces définitions se généralisent à d'autres objets que les nœuds dans $\mathbb{S}^3$, comme les entrelacs dans $\mathbb{S}^3$ (pour lesquels il y a *plusieurs* généralisations!), mais aussi :

- les enchevêtrements (*tangles*),
- les graphes,
- les nœuds en plus haute dimension,
- les nœuds dans d'autres 3-variétés que $\mathbb{S}^3$
- les 3-variétés,
- les groupes de présentation finie,

— etc.

Dans le tableau de la Figure 7, on listera les différentes définitions vues dans le cours et pour quels objets autres que les nœuds chacune se généralise. Un L signifie une généralisation aux entrelacs avec un polynôme à une seule variable, et L^μ signifie une généralisation aux entrelacs avec un polynôme multivarié.

Définition	Référence	Origine	Généralisations
A	1.23, 1.30, ??	Alexander (régions de diagramme)	L
B	??	Représentation de Burau	L
C	6.6, 6.13, 6.18	Homologie du revêtement infini cyclique	L, L^μ
F	??, ??	Calcul de Fox, pgcd des mineurs	L, L^μ
FW	??, ??	Calcul de Fox, présentation de Wirtinger, tout mineur	L
G	5.27	G'/G'' où G est le groupe du nœud	
R	??	Torsion de Reidemeister	L, L^μ
RF	??, ??	Calcul de Fox, facteur de compensation	L, L^μ
S	4.36	Surface de Seifert	L
X	2.23	Relation d'écheveaux	L

FIGURE 7. Index des définitions du polynôme d'Alexander

La Figure 8 représente les liens abordés dans le cours entre les différentes définitions du polynôme d'Alexander. Une définition (représentée par une ou deux lettres capitales) encadrée en pointillés est exclusive aux nœuds, une encadrée simplement s'applique aux nœuds et aux entrelacs (avec une seule variable t), et une avec un double cercle s'applique aux entrelacs sous forme univariée et multivariée.

1.3. Diagrammes.

Définition 1.12. Un *diagramme d'entrelacs* (orienté) D est la donnée des objets suivants :

- une immersion (lisse) $\sqcup_{i=1}^m \mathbb{S}^1 \rightarrow \mathbb{R}^2$ d'une union disjointe de cercles orientés dans le plan, dont les seuls points multiples sont des points doubles en nombre fini (appelés *croisements* de D) où les deux tangentes sont distinctes (voir Figure 9),
- une information “dessus/dessous” à chaque croisement, représentée d'une des deux façons de la Figure 10.

La Figure 3 comprend plusieurs exemples de diagrammes d'entrelacs (pour le câble et le double de Whitehead, on a omis de dessiner certains traits courts évidents pour une meilleure lisibilité).

On peut associer à tout diagramme d'entrelacs D un entrelacs L , de la manière suivante : pour chaque point du diagramme D hors d'un voisinage de chaque croisement, on associe un point de $\mathbb{R}^3$ via

$$D \subset \mathbb{R}^2 \cong \mathbb{R}^2 \times \{0\} \subset \mathbb{R}^3,$$

et au voisinage de chaque croisement on procède comme à la Figure 11, en déplaçant le brin du dessous un peu en-dessous du plan d'altitude 0 (sur la Figure 11, les points d'altitude 0 sont en noir, ceux d'altitude $-\epsilon < 0$ sont en rouge, et les intermédiaires sont en bleu).

Réciproquement, on peut associer à un entrelacs un diagramme d'entrelacs, par le théorème suivant.

Théorème 1.13. *Tout entrelacs de $\mathbb{R}^3$ est équivalent à un entrelacs dont la projection sur $\mathbb{R}^2 \times \{0\}$ donne un diagramme d'entrelacs.*

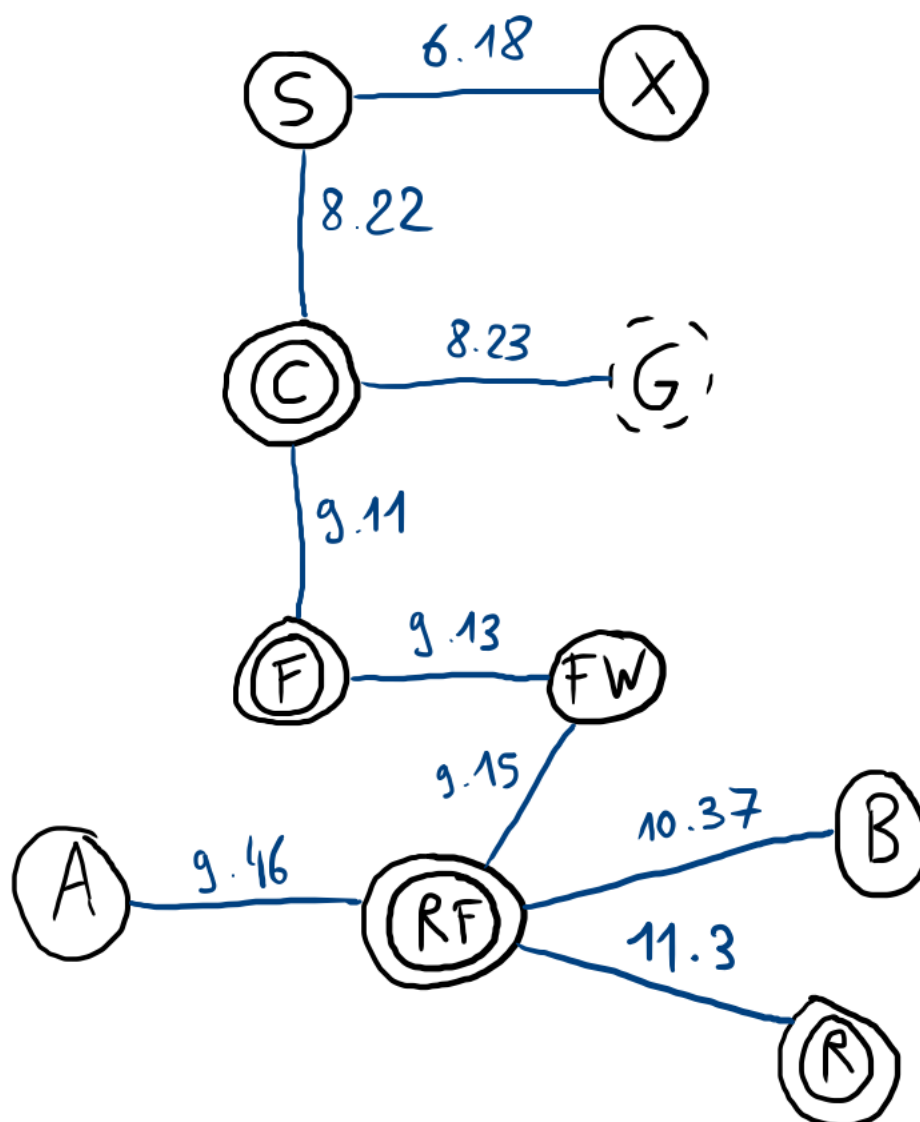


FIGURE 8. Index des définitions du polynôme d'Alexander

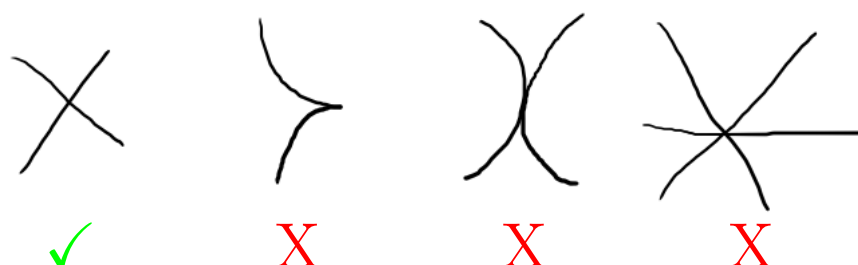


FIGURE 9. Points multiples autorisés (✓) et interdits (X).

La preuve du Théorème 1.13 sera admise. Remarquons que le diagramme obtenu ainsi est loin d'être unique, comme on peut s'en convaincre en tournant un nœud dans l'espace et en voyant comment le diagramme projeté change.

En passant à la représentation bi-dimensionnelle très pratique, on gagne donc beaucoup d'ambiguïté. Heureusement, cette ambiguïté est entièrement décrite par quatre types de mouvements simples sur les diagrammes.

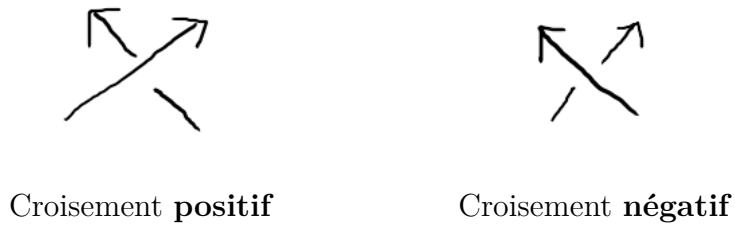


FIGURE 10. Deux façons d'encoder l'information "dessus/dessous".

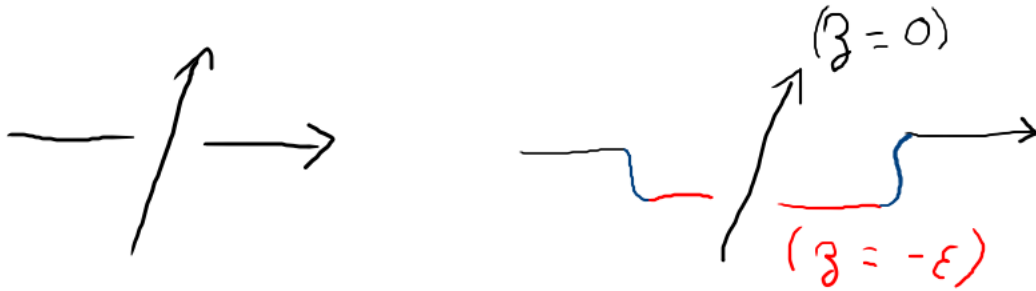
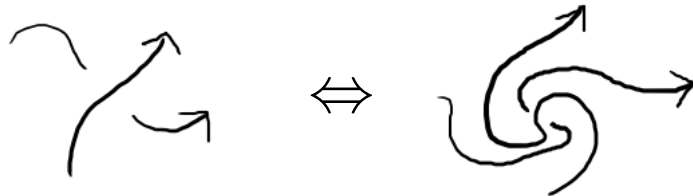


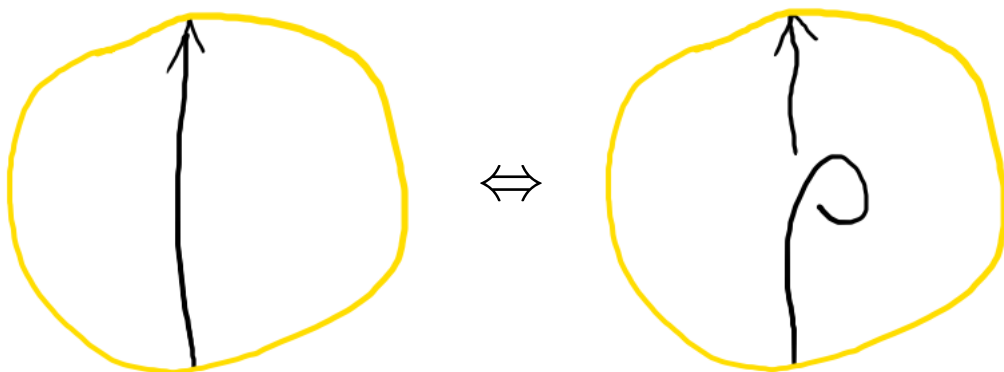
FIGURE 11. Construire un entrelacs (droite) à partir d'un diagramme (gauche).

Définition 1.14 (Reidemeister). Les *mouvements de Reidemeister* sont des opérations sur l'ensemble des diagrammes d'entrelacs, de quatre types :

- le type $R0$: une *isotopie planaire*, i.e. une isotopie entre deux diagrammes d'entrelacs par rapport au plan ambiant, dont l'image à chaque temps est un diagramme d'entrelacs (sans singularité interdite comme à la Figure 9)).

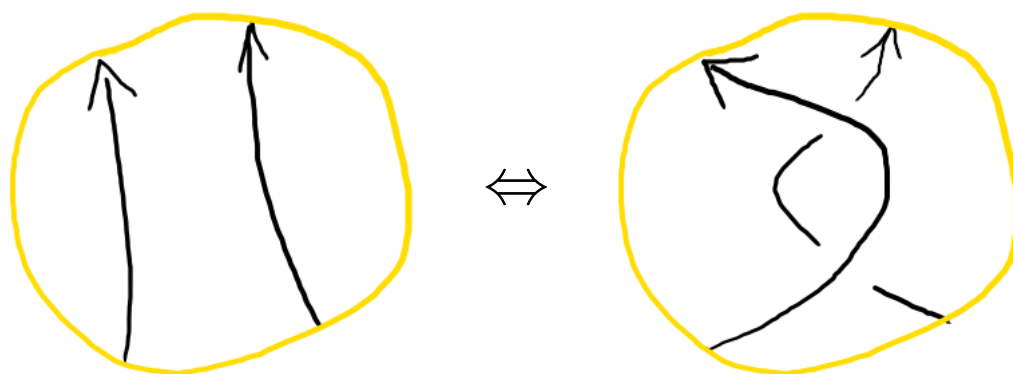


- le type $R1$: ajout ou retrait d'une boucle, i.e. remplacement d'un disque du plan par un autre de la manière suivante :



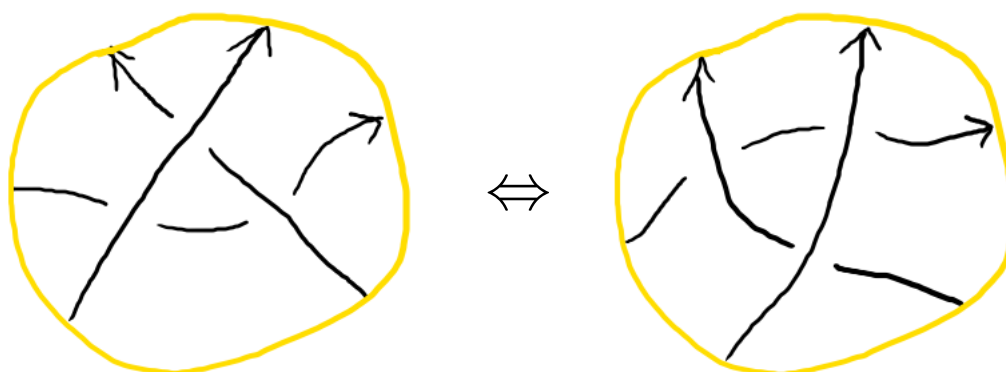
ou d'autres manières similaires (cf Remarque 1.15 ci-après).

- le type $R2$: glissement d'un brin au-dessus d'un autre brin, i.e. remplacement d'un disque du plan par un autre de la manière suivante :



ou d'autres manières similaires (cf Remarque 1.15 ci-après).

- le type $R3$: glissement d'un brin au-dessus ou en-dessous d'un croisement, i.e. remplacement d'un disque du plan par un autre de la manière suivante :



ou d'autres manières similaires (cf Remarque 1.15 ci-après).

On dira que deux diagrammes d'entrelacs sont R -équivalents si l'on peut passer de l'un à l'autre par une suite finie de mouvements de Reidemeister.

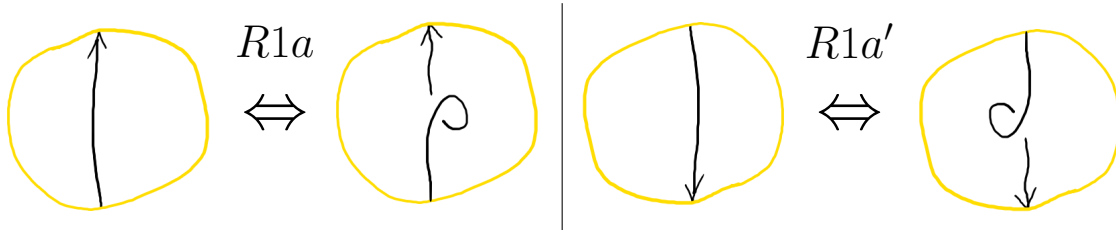
Remarque 1.15. Les "autres manières équivalentes" mentionnées dans la Définition 1.14 sont a priori nombreuses, particulièrement en travaillant avec des diagrammes orientés. Par souci de complétude, listons-les ci-après.

- Pour $R1$, il y a 8 configurations : en partant d'un brin vertical sans boucle, la boucle peut être ajoutée à droite ou à gauche, l'orientation du brin peut être vers le haut ou le bas, et le croisement créé peut être positif ou négatif.
- Pour $R2$, il y a 8 configurations : en partant de deux brins verticaux parallèles, le sens de parcours du brin de gauche peut être ascendant ou descendant, de même pour le brin de droite, et le brin passant par dessus l'autre peut être le gauche ou le droit.
- Pour $R3$, il y a 32 configurations : en partant d'une configuration triangulaire où la pointe est en haut et le brin glissant est l'horizontal, on peut choisir indépendamment des sens de parcours pour chacun des trois brins, le signe du croisement sur lequel le brin horizontal glisse, et enfin si le brin horizontal est au-dessus ou en-dessous des deux autres.

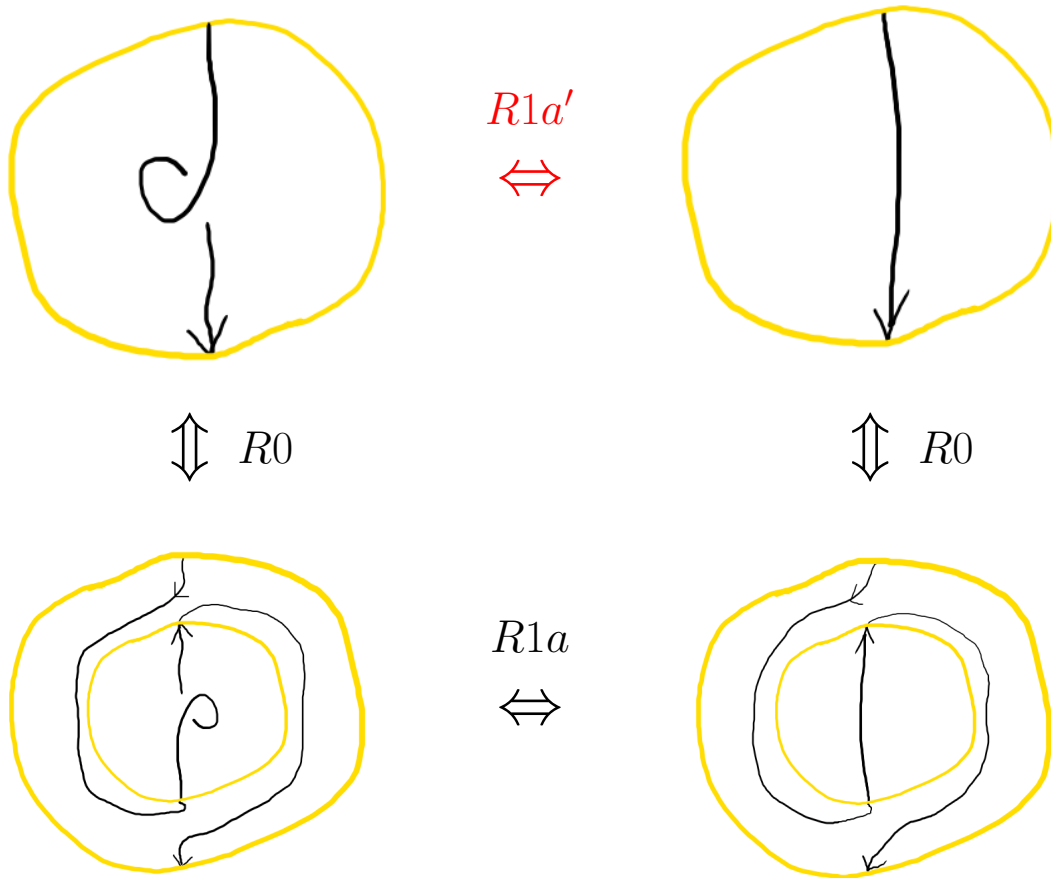
Si nous n'avons pas dessiné toutes ces configurations dans la Définition 1.14, ce n'est pas seulement pour ne pas faire fuir les lecteurs, mais aussi car, comme nous allons le voir bientôt, on peut se contenter de retenir et d'utiliser seulement une petite partie de ces nombreuses configurations.

Remarque 1.16. Pour $i \in \{1, 2, 3\}$, on utilisera régulièrement l'abus de langage suivant : un mouvement de type Ri désignera plutôt la **composition** d'une isotopie planaire de type $R0$, du remplacement de disque décrit dans la Définition 1.14, et d'une autre isotopie planaire. En conséquence, on n'a plus besoin qu'un diagramme d'entrelacs ait un disque *exactement comme* dans la Définition 1.14 pour pouvoir appliquer un mouvement de type Ri . La compréhension intuitive des mouvements de Reidemeister ("on enlève une boucle" par exemple) coïncide maintenant rigoureusement avec le terme "mouvement de type Ri ".

Pour le mouvement de type $R1$, deux des 8 configurations mentionnées dans la Remarque 1.15 sont $R1a$ et $R1a'$ dessinées ci-après :



On peut maintenant voir dans la figure suivante que quitte à composer avec des isotopies planaires et changer de disque de restriction, les mouvements de type $R1a'$ et de type $R1a$ sont équivalents :



Exercice (Exercice 1.C). (1) En vous aidant de dessins et en raisonnant comme ci-dessus, montrer qu'au sens de la Remarque 1.16, il n'existe qu'au plus 4 sortes

différentes de mouvements de type $R1$, au plus 4 de type $R2$ et au plus 8 de type $R3$, tous étant dessinés respectivement dans les Figures 12, 13 et 14.

- (2) Question plus ouverte : montrer que les 16 cas des Figures 12, 13 et 14 sont tous différents, i.e. qu'il n'en existe pas deux équivalents via composition par des isotopies planaires.

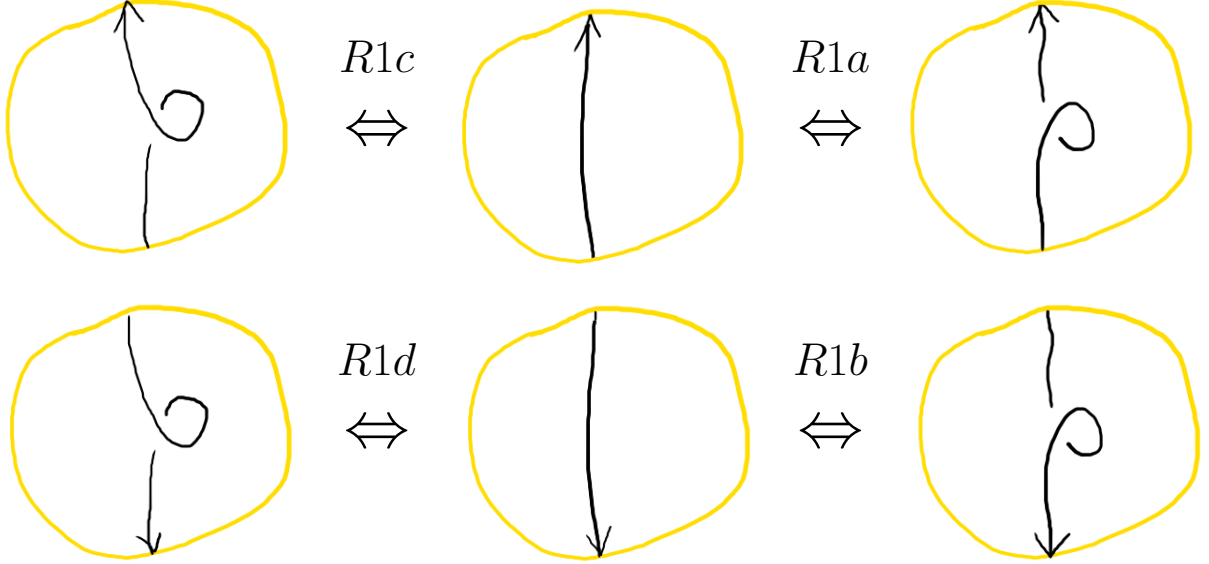


FIGURE 12. Les 4 mouvements de type $R1$ (à $R0$ près)

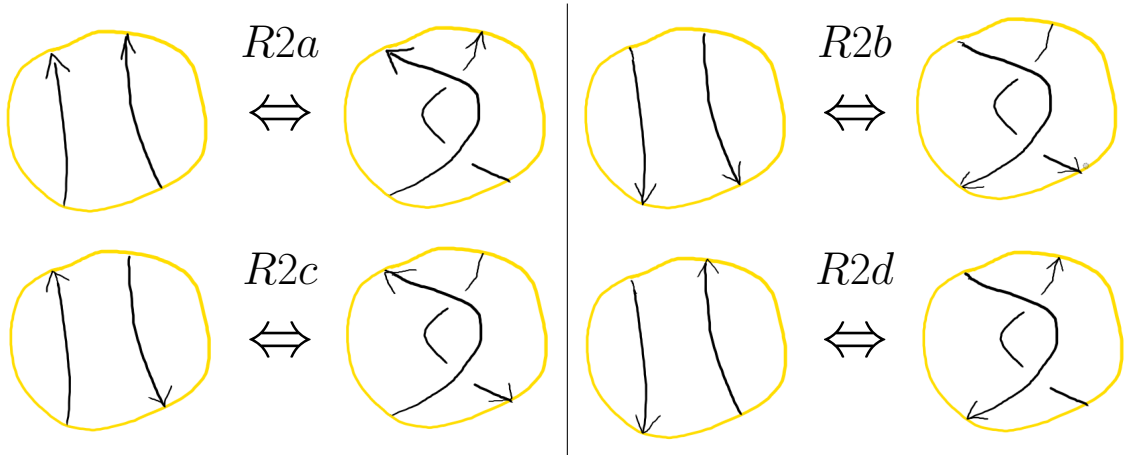


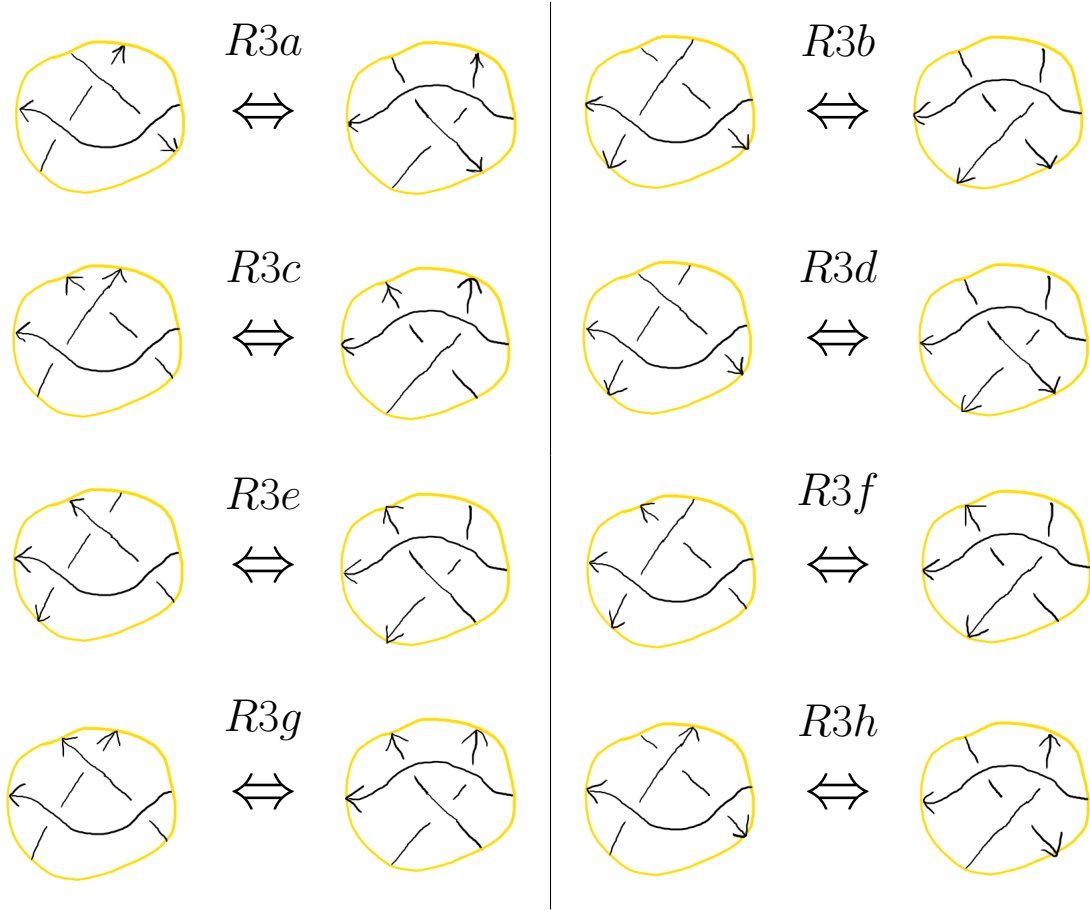
FIGURE 13. Les 4 mouvements de type $R2$ (à $R0$ près)

Théorème 1.17 (Reidemeister). *Soient D, D' des diagrammes des entrelacs L, L' . Alors L et L' sont équivalents si et seulement si D et D' sont R -équivalents.*

On pourra trouver une preuve de ce théorème fondateur dans [BZ, Proposition 1.17].

Corollaire 1.18. *Soit une fonction F définie sur l'ensemble des diagrammes d'entrelacs. Supposons que pour tous diagrammes D, D' R -équivalents, on ait $F(D) = F(D')$.*

Alors, en notant ψ une fonction qui envoie un entrelacs sur un de ses diagrammes, $F \circ \psi$ est un invariant d'entrelacs.

FIGURE 14. Les 8 mouvements de type $R3$ (à $R0$ près)

Il suit du Corollaire 1.18 que pour construire un invariant d'entrelacs, on peut se contenter de travailler sur les diagrammes planaires, à condition de vérifier l'invariance par les mouvements de Reidemeister.

Une difficulté apparaît alors. Rigoureusement, chacun des types $R1$, $R2$, $R3$ sur les diagrammes orientés englobe en fait plusieurs types de mouvements qui ne sont pas interchangeables (en tout cas, pas d'une manière qui saute aux yeux). Ces 16 mouvements aller-retour (ou 32 si on compte l'aller et le retour séparément) sont listés sur les Figures 12, 13 et 14. Pour prouver qu'une fonction F de diagrammes d'entrelacs est invariante par mouvements de Reidemeister, il faudrait donc montrer qu'elle est invariante par isotopie planaire et par les 32 mouvements des Figures 12, 13 et 14, ce qui peut sembler peu attrayant.

Heureusement, M. Polyak et P. Suwara [Po, Su] ont démontré qu'il suffit de vérifier l'invariance par isotopie planaire et seulement **quatre** mouvements aller-retour (donc huit mouvements en tout), car ces mouvements engendrent tous les autres. Ces quatre mouvements sont notés $R1a$, $R1b$, $R2a$ et $R3a$ et sont décrits sur la Figure 15.

Théorème 1.19 (Polyak-Suwara [Po, Su]). *Soit D, D' des diagrammes d'entrelacs orientés R -équivalents. Alors il existe une suite finie de mouvements de types $R0$, $R1a$, $R1b$, $R2a$ et $R3a$ qui permet de passer de D à D' .*

Nombre et matrice d'enlacement d'un entrelacs (pas vu en Séance 1, mais en Séance 4). Pour c un croisement d'un diagramme d'entrelacs D , on dira que son *signe* $\epsilon(c)$ est égal à 1 si c est positif (voir Figure 10) et -1 si c est négatif.

Voyons maintenant un premier invariant d'entrelacs qu'on peut définir à partir de diagrammes, le *nombre d'enlacement*.

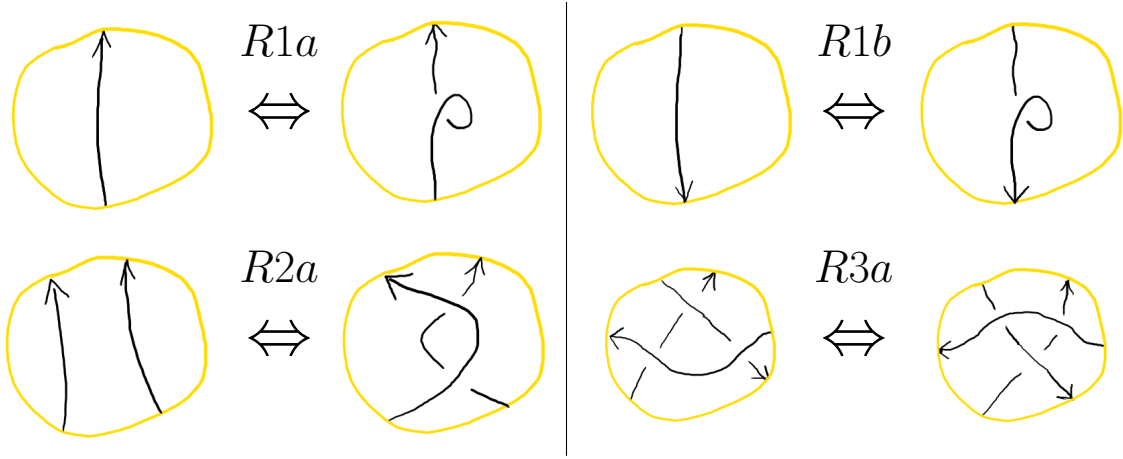


FIGURE 15. Une famille génératrice minimale de mouvements de Reidemeister

Proposition 1.20. *Soit $L = L_1 \cup L_2$ un entrelacs et D un diagramme de L . Alors la quantité*

$$\text{lk}(L) = \text{lk}(L_1, L_2) = \text{lk}(D) := \frac{1}{2} \sum_{\substack{c \text{ croisement de } D \\ \text{entre } L_1 \text{ et } L_2}} \epsilon(c)$$

est un nombre entier, ne dépend pas du choix de D , et est appelée le nombre d'enlacement (linking number) de L . Le nombre d'enlacement est un invariant d'entrelacs.

Démonstration. On va démontrer que $\text{lk}(D)$ est inchangé par les mouvements de Reidemeister. Le fait que $\text{lk}(D)$ est entier sera laissé en exercice ci-après. Par le Théorème 1.19, on peut se restreindre à prouver l'invariance par les mouvements de types $R0$, $R1a$, $R1b$, $R2a$ et $R3a$.

Type $R0$: Une isotopie planaire ne change pas la nature des croisements, leur signe ou quelles composantes de L ils impliquent. Ainsi $\text{lk}(D)$ est inchangé.

Types $R1a$ et $R1b$: Ces mouvements ajoutent ou retirent un croisement entre une composante et elle-même, qui n'est donc pas pris en compte dans le calcul de $\text{lk}(D)$. Ainsi, $\text{lk}(D)$ est inchangé.

Type $R2a$: Ce mouvement ajoute ou retire une paire de croisements de signes opposés. Ainsi, que ce mouvement mette en jeu deux brins venant de la même composante ou de deux composantes distinctes, $\text{lk}(D)$ restera inchangé.

Type $R3a$: Ce mouvement modifie le placement de trois croisements, mais pour chacun de ces trois croisements, ni le signe ni les composantes de L auxquelles appartiennent les deux brins ne sont modifiés. Ainsi $\text{lk}(D)$ est inchangé. $\square$

Remarque 1.21. La définition du nombre d'enlacement repose implicitement sur l'orientation choisie pour l'espace ambiant $\mathbb{S}^3$, à savoir celle de la main droite. Si $\mathbb{S}^3$ est muni de l'orientation main gauche, alors le nombre d'enlacement est multiplié par (-1) .

Exercice (Exercice 1.I). *Soit $L = (L_1, L_2)$ un entrelacs à deux composantes de diagramme D et $L' := L_1 \sqcup L_2$.*

- (1) *Montrer qu'il existe une famille de croisements de D entre L_1 et L_2 tels que si l'on inverse les signes de ces croisements, on obtient un diagramme D' de L' .*
- (2) *Montrer que changer le signe d'un croisement ne change pas la parité de*

$$\sum_{\substack{c \text{ croisement} \\ \text{entre } L_1 \text{ et } L_2}} \epsilon(c).$$

(3) Calculer le nombre d'enlacement de L' .

(4) Conclure que le nombre d'enlacement de L est entier.

Définition 1.22. Soit $L = (L_1, \dots, L_m)$ un entrelacs à $m \geq 2$ composantes. Sa *matrice d'enlacement* est notée $Lk(L) \in M_{m,m}(\mathbb{Z})$ et est la matrice symétrique de diagonale nulle et de coefficient $Lk(L)_{i,j}$ égal à $lk(L_i, L_j)$.

Il est immédiat que la matrice d'enlacement est aussi un invariant d'entrelacs.

Exercice (Exercice 1.J). *Calculer les matrices d'enlacement des entrelacs de la Figure 3.*

Morceaux choisis de l'histoire de la théorie des nœuds (pas vu en séance 1).

(La plupart des faits racontés dans cette section sont consultables avec plus de détails sur les pages *Wikipedia* correspondantes, et nous vous encourageons à y jeter un oeil.)

Bien que l'humanité ait noué des ficelles depuis longtemps, on date le début de la théorie des nœuds en tant que théorie scientifique à la deuxième moitié du 19e siècle, sur l'impulsion du physicien William Thomson (Lord Kelvin).

Ce dernier proposa en effet dans les années 1860 une nouvelle théorie *physique* : les atomes seraient des nœuds ou des entrelacs formés par des tourbillons dans l'*éther* (une substance sous-jacente à notre univers), à l'image d'anneaux de fumée. Le physicien Peter Guthrie Tait expérimentait sur de tels anneaux de fumée, et travailla avec Kelvin sur les premières tables de nœuds, similaires à celles qu'on connaît de nos jours.

La théorie de Kelvin fut ensuite abandonnée à la suite de l'expérience de Michelson-Morley dans les années 1880 qui mettait en doute l'existence de l'éther. Cependant, le travail purement *mathématique* de classification des nœuds entamé par Tait fut repris dès le début du 20e siècle par des mathématiciens, comme une nouvelle partie de la *topologie*.

Cette première page de l'histoire de la théorie des nœuds met déjà en évidence l'imprévisibilité et l'interconnectivité de la science : une étape intermédiaire d'une théorie physique sans succès mène au développement d'une théorie mathématique majeure, qui elle-même aura des applications extraordinaires dans d'autres sciences. Mais n'anticipons pas.

Les fondements de la théorie (mathématique) des nœuds sont dûs à des topologues du début du 20e siècle comme Max Dehn, J. W. Alexander et Kurt Reidemeister (des noms que nous retrouverons souvent dans ce cours). Les outils utilisés provenaient principalement de la *topologie algébrique*, comme les groupes d'homotopie ou d'homologie.

Dans les années 1970, William Thurston établit de profonds liens entre la théorie des nœuds et la géométrie des variétés de dimension 3, notamment la *géométrie hyperbolique*.

Les années 1980 virent ensuite la naissance de la *topologie quantique*, à la suite de la découverte par Vaughn Jones du polynôme portant son nom en 1984, que le physicien Edward Witten interpréta dans une théorie de physique quantique. Comme un siècle auparavant, une théorie physique (la théorie quantique des champs) inspira alors de nouveaux objets mathématiques, les *invariants quantiques*. De tels objets sont les invariants de (Witten-)Reshetikhin-Turaev et les invariants de Turaev-Viro, et plus généralement des *théories des champs quantiques topologiques* (ou *TQFT* en anglais).

Plus étonnant encore, la physique n'est pas la seule autre science avec laquelle la théorie des nœuds a interagi. Dans les années 1990, la biologie moléculaire bénéficia des outils mathématiques tels que les enchevêtrements, via les travaux de Claus Ernst et De Witt L. Sumners. Ces derniers identifièrent comment agissait une certaine enzyme (une *topoisomérase*) sur la topologie de la double hélice de la molécule d'ADN, en identifiant les entrelacs avant et après l'action de l'enzyme. Les topoisomérases ont eu depuis des applications en biologie moléculaire et en médecine, notamment pour traiter certains cancers.

Difficile maintenant de dire ce que le futur apportera à la théorie des nœuds. Qui sait, peut-être que suivre ce cours vous donnera envie de rejoindre l'aventure...

1.4. La Définition A d'Alexander. Dans ce chapitre nous présenterons la première définition du polynôme d'Alexander, due au mathématicien du même nom et publiée dans [Al]. Nous nous appuierons également sur [Lo]. Cette définition peut sembler *ad hoc* à première vue, mais est une des plus pratiques pour calculer le polynôme d'Alexander pour un nœud quelconque donné.

Considérons un diagramme de nœud D orienté, à n croisements.

Exercice (Exercice 1.D). *Montrer que D délimite le plan en $n+2$ régions homéomorphes à des disques. On pourra utiliser la caractéristique d'Euler-Poincaré de $\mathbb{S}^2$.*

Dénotons pour la suite de ce chapitre $c_1, \dots, c_n$ les croisements de D , et $R_0, \dots, R_{n+1}$ les régions délimitées par D , avec R_0 la région non bornée. On construit alors une matrice $A \in M_{n, n+2}(\mathbb{Z}[t])$ de la manière suivante : chaque ligne de A correspond à un croisement c_i , chaque colonne à une région R_j , et le coefficient $(i, j+1)$ de A vaut

- 0 si R_j ne touche pas c_i ,
- $-t$ si R_j est la région à **gauche** du brin de **dessous**, **avant** qu'il n'arrive à c_i ,
- 1 si R_j est la région à **droite** du brin de **dessous**, **avant** qu'il n'arrive à c_i ,
- t si R_j est la région à **gauche** du brin de **dessous**, **après** qu'il n'arrive à c_i ,
- -1 si R_j est la région à **droite** du brin de **dessous**, **après** qu'il n'arrive à c_i ,
- la somme de deux termes précédents si leurs deux cas se produisent à la fois.

Ces conventions sont résumées sur la Figure 16. Remarquons que le signe du croisement n'est pas important ici.

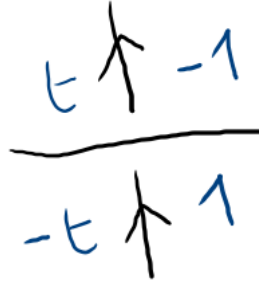


FIGURE 16. Coefficients autour d'un croisement

Définition 1.23 (Définition A, [Al]). Soit K un nœud orienté. Soit D un diagramme de K . Soit n le nombre de croisements de D .

Soit A la matrice de $M_{n, n+2}(\mathbb{Z}[t])$ définie ci-dessus, et $A' \in M_{n, n}(\mathbb{Z}[t])$ une sous-matrice de A obtenue en retirant deux colonnes de A correspondant à des régions de D adjacentes.

Alors le *polyôme d'Alexander* de K est noté $\Delta_K(t)$ et est défini comme la classe d'équivalence du déterminant de A' à multiplication par un inversible de $\mathbb{Z}[t, t^{-1}]$ près :

$$\Delta_K(t) := [\det(A')] \in \mathbb{Z}[t, t^{-1}] / \{\pm t^{\mathbb{Z}}\}.$$

Remarquons qu'avec la Définition 1.23, $\Delta_K(t)$ n'a pas de termes de degré strictement négatif, mais pour plusieurs définitions suivantes, il sera naturel de considérer cette possibilité ; c'est pourquoi nous mentionnons $\mathbb{Z}[t, t^{-1}] / \{\pm t^{\mathbb{Z}}\}$ comme l'ensemble où vit $\Delta_K(t)$ dès maintenant.

Pour deux polynômes de Laurent $P, Q \in \mathbb{Z}[t, t^{-1}]$, on notera $P \doteq Q$ s'il existe $m \in \mathbb{Z}$ tel que $P(t) = \pm t^m Q(t)$. En manipulant des polynômes d'Alexander, on utilisera souvent l'abus de langage consistant à identifier la $\doteq$ -classe d'équivalence à un de ses représentants, et on utilisera $=$ ou $\doteq$ selon le contexte.

Exemple 1.24. Pour $K = U$ le nœud trivial, le diagramme le plus simple a 0 croisements et 2 régions, ce qui implique que A' est la matrice vide, de déterminant 1 par convention.

On peut ne pas être complètement à l'aise avec le raisonnement précédent, et c'est un cas de figure qui arrivera quelquefois avec l'exemple du nœud trivial. Pour se rassurer, on peut prendre un autre diagramme de U , en symbole “infini”, comme sur la Figure 17.

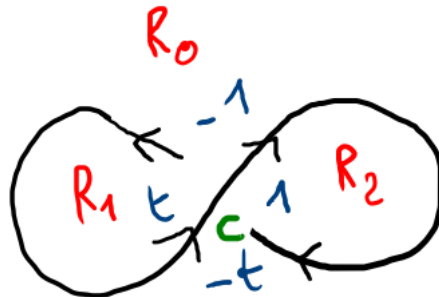


FIGURE 17. L'exemple du nœud trivial

Ce diagramme a un seul croisement c et trois régions R_0, R_1, R_2 , et la matrice A est $A =_c \begin{bmatrix} R_0 & R_1 & R_2 \\ -1-t & t & 1 \end{bmatrix}$. Ainsi, en retirant la paire de colonnes correspondant à R_0, R_1 (resp. à R_0, R_2), on trouve encore $\Delta_U = 1$ (resp. $\Delta_U = t$, ce qui est la même chose à multiplication par $\pm t^{\mathbb{Z}}$ près).

En revanche, retirer les colonnes des régions R_1, R_2 , qui ne sont pas adjacentes, donnerait un polynôme $-t - 1$, non équivalent à 1.

Exemple 1.25. Pour $K = 3_1$ le nœud de trèfle droit, prenons le diagramme orienté D de la Figure 18.

La matrice A est donc :

$$A = \begin{matrix} & R_0 & R_1 & R_2 & R_3 & R_4 \\ \begin{matrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} t & -t & -1 & 0 & 1 \\ t & 0 & -t & -1 & 1 \\ t & -1 & 0 & -t & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

Si l'on retire les deux première colonnes (qui correspondent bien à deux régions adjacentes R_0 et R_1), on calcule donc

$$\Delta_K(t) = \det(A') = 1 - t + t^2.$$

Le théorème suivant établit que la Définition 1.23 donne bien un invariant de nœuds. Nous le démontrerons dans le reste de ce chapitre.

Théorème 1.26. [Al] *L'objet $\Delta_K(t)$ de la Définition 1.23 est bien défini et ne dépend ni du choix du diagramme D , ni de l'ordre choisi sur les croisements ou les régions, ni de la paire de colonnes retirée.*

Pour se convaincre de la véracité du Théorème 1.26, on pourra essayer de modifier des choix à partir des Exemples 1.24 ou 1.25.

Plus loin dans le cours, à l'aide d'autres définitions que la Définition 1.23, on démontrera que le polynôme d'Alexander est toujours (à $\doteq$ près) :

- inchangé en remplaçant un nœud par son image miroir,
- inchangé en remplaçant un nœud par son inverse,
- inchangé en remplaçant t par $\frac{1}{t}$, i.e. ses coefficients sont symétriques.

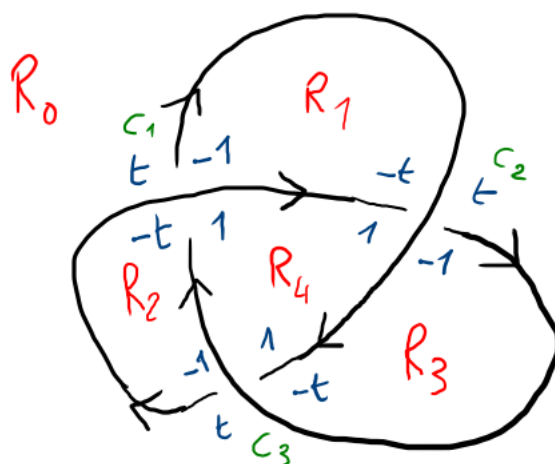


FIGURE 18. L'exemple du trèfle droit

Pour l'heure, on peut démontrer le résultat partiel suivant :

Proposition 1.27. Soit K un nœud et $-K$ son inverse. Alors $\Delta_{-K}(t) \doteq \Delta_K\left(\frac{1}{t}\right)$.

Exercice (Exercice 1.E). Démontrer la Proposition 1.27.

Régions et colonnes (pas vu en séance 1, mais en séance 3). Pour le reste de cette section, soit D un diagramme de nœud, à n croisements notés $c_1, \dots, c_n$ et $n + 2$ régions notées $R_0, \dots, R_{n+1}$. Supposons de plus que R_0 est la région non bornée du plan.

Une famille d'indices pour D est la donnée d'un entier $i(R)$ pour chacune des régions R de D (l'indice de R), de sorte que si deux régions sont adjacentes comme sur la Figure 19, alors leurs indices diffèrent de 1 comme sur la même Figure 19 (passer de droite à gauche d'un brin augmente l'indice de 1).

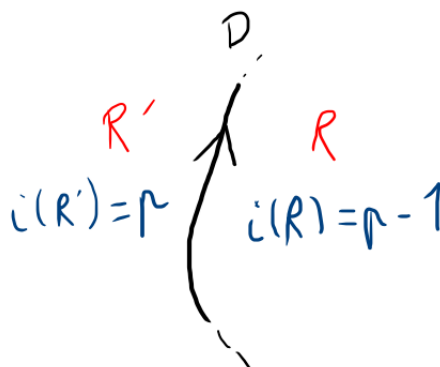


FIGURE 19. Deux indices de régions adjacentes sont consécutifs

Une telle famille d'indices ne dépend que de la donnée d'un seul de ces indices (les autres étant automatiquement imposés en conséquence), et est bien définie (on peut s'en convaincre via le fait que le nombre d'intersection algébrique de deux courbes du plan est toujours nul). Ainsi on peut fixer arbitrairement que l'indice de R_0 est nul.

Exemple 1.28. Avec la convention $i(R_0) = 0$, on trouve

$$i(R_1) = 1, \quad i(R_2) = -1$$

sur la Figure 17, et

$$i(R_1) = i(R_2) = i(R_3) = -1, \quad i(R_4) = -2$$

sur la Figure 18.

La répartition des indices des quatre régions autour d'un croisement (ou trois dans de rares cas comme celui de la Figure 17) dépend du signe de ce croisement, comme on peut le voir sur la Figure 20.

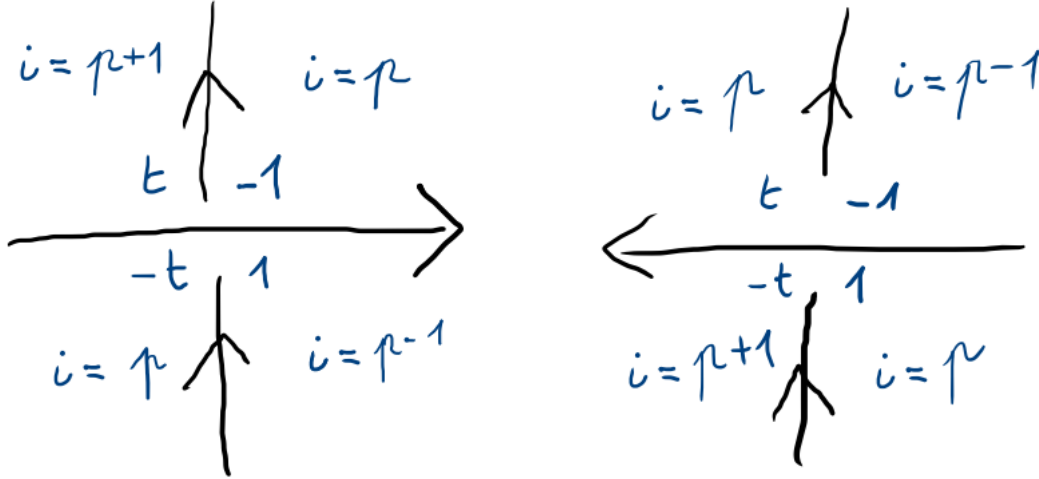


FIGURE 20. Indices autour d'un croisement

Nous allons étudier comment change le déterminant d'une sous-matrice $n \times n$ de A selon quelle paire de colonnes on retire à A (pas forcément des colonnes venant de régions adjacentes).

Proposition 1.29. Les vecteurs $C = \begin{matrix} R_0 \\ \vdots \\ R_{n+1} \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$ et $I = \begin{matrix} R_0 \\ \vdots \\ R_{n+1} \end{matrix} \begin{bmatrix} t^{-i(R_0)} \\ \vdots \\ t^{-i(R_{n+1})} \end{bmatrix}$ vérifient

$$A \cdot C = 0 = A \cdot I.$$

Démonstration. On vérifie les deux égalités pour chaque ligne de A , donc en regardant croisement par croisement. Selon la Figure 20, on a bien à chaque croisement

- $t + (-1) + (-t) + 1 = 0$,
- $t^{-(p+1)}t + t^{-p}(-1) + t^{-p}(-t) + t^{-(p-1)}1 = 0$ pour un croisement positif,
- $t^{-p}t + t^{-(p-1)}(-1) + t^{-(p+1)}(-t) + t^{-p}1 = 0$ pour un croisement négatif.

D'où le résultat. □

Pour deux indices $j, k \in \{0, \dots, n+1\}$ différents, on notera $A_{j,k}$ ou $A_{k,j}$ la sous-matrice de A obtenue en retirant les j -ème et k -ème colonnes de A .

Proposition 1.30. Pour tous $j, k, l, m \in \{0, \dots, n+1\}$ avec $j \neq k$ et $l \neq m$, on a

$$\left(t^{i(R_j)-i(R_k)} - 1\right) \det(A_{l,m}) \doteq \left(t^{i(R_l)-i(R_m)} - 1\right) \det(A_{j,k}).$$

En particulier, $\det(A_{j,k}) = 0$ si $i(R_j) = i(R_k)$.

De plus, si on appelle K le nœud de diagramme D , alors on a :

$$\Delta_K(t) \doteq \frac{t-1}{t^{i(R_j)-i(R_k)} - 1} \det(A_{j,k})$$

pour tous j, k tels que $i(R_j) \neq i(R_k)$.

Démonstration. On utilise les relations linéaires entre les colonnes données par la Proposition 1.29. Les détails sont donnés dans [Lo] et [Al] et seront admis. $\square$

On pourra vérifier la formule de la Proposition 1.30 avec les matrices des Exemples 1.24 et 1.25.

Preuve de l'invariance. Nous avons maintenant tous les outils pour démontrer le Théorème 1.26.

Démonstration du Théorème 1.26. Montrons que $\det(A')$ ne dépend pas des choix faits.

Soient R_j, R_k deux régions adjacentes de D telles que $A' = A_{j,k}$. Alors il suit de la Proposition 1.30 que $\det(A')$ ne dépend pas des indices j, k ainsi choisis (à $\pm$ près toujours).

D'autre part, toute permutation des croisements de D (si on les avait ordonnés d'une autre manière) se traduira en une permutation des lignes de A' , et multiplierà donc $\det(A')$ par ± 1 .

De même, ordonner les régions de D différemment causera une permutation des colonnes de A , et ne changera pas $\det(A')$ à $\pm$ près.

Enfin, vérifions que $\det(A')$ reste inchangé si on modifie D par les mouvements de Reidemeister. On peut se restreindre aux mouvements $R0, R1a, R1b, R2a, R3a$ du Théorème 1.19.

Une isotopie planaire $R0$ ne change pas les configurations locales autour des croisements, donc ne change pas A ni $\det(A')$.

Montrons l'invariance par $R1a$. Soient R_j et R_k les deux régions adjacentes de D de part et d'autre du brin où on ajoute une boucle. La boucle crée un nouveau croisement c' et une nouvelle région R' , cf Figure 21. Appelons $A(D)$ la matrice A du diagramme D ,

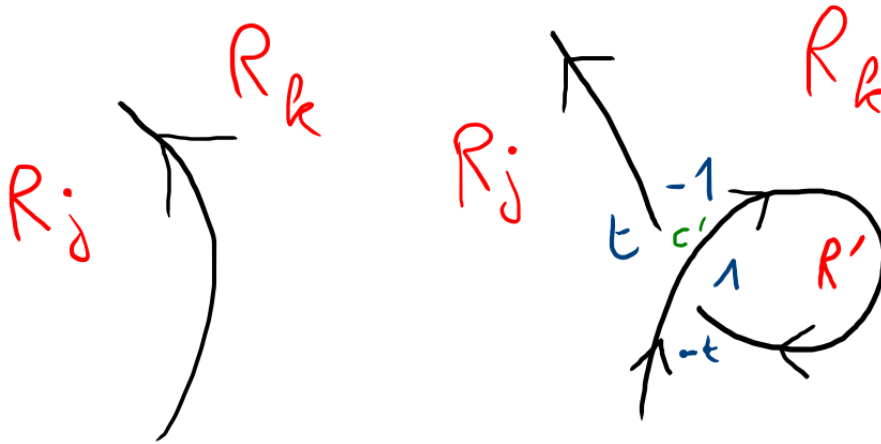


FIGURE 21. Invariance par $R1a$

D' le diagramme obtenu depuis D par ajout de la boucle, et $A(D')$ la matrice A de D' . Il suit de la Figure 21 que

$$A(D') =_{c'} \begin{bmatrix} A(D)_{j,k} & R_j & R_k & R' \\ 0 & * & * & 0 \\ t & -t-1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

donc $\det(A(D')_{j,k}) = \det(A(D)_{j,k})$.

Les invariances par $R1b, R2a$ et $R3a$ se démontrent similairement et sont laissées en exercice (Exercice 1.4 ci-après). $\square$

Exercice (Exercice 1.F). Compléter la démonstration du Théorème 1.26 en montrant l'invariance par $R1b, R2a$ et $R3a$.

Noeuds toriques $T(2, q)$ (pas vu en séance 1, mais en séance 2). Soit $q \geq 1$ un entier impair. Le *nœud torique* $T(2, q)$ est défini par le diagramme de la Figure 22.

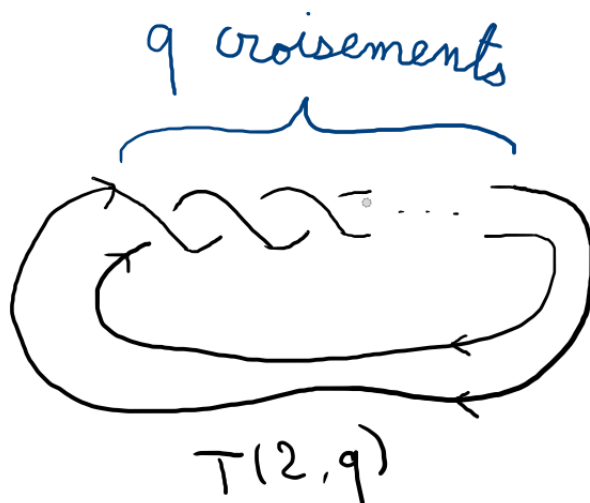


FIGURE 22. Le nœud torique $T(2, q)$ (avec $q \geq 1$ impair)

On définira plus loin des *entrelacs toriques* généraux $T(m, n)$ avec $m, n \in \mathbb{Z}$, dont le nombre de composantes est $\text{pgcd}(m, n)$.

Exemple 1.31. Les premiers nœuds de cette famille sont $T(2, 1) = U$, $T(2, 3) = 3_1$, $T(2, 5) = 5_1$, et $T(2, 7) = 7_1$. On peut consulter les suivants sur *Knotinfo* ou *Knot Atlas*.

Exercice (Exercice 1.G). *Pour tous les entiers $q \geq 1$ impairs, calculer le polynôme d'Alexander $\Delta_{T(2, q)}(t)$.*

1.5. Exercices Séance 1 (4 mars 2026) : Nœuds, entrelacs et Définition A.

Exercice 1.A. (1) Montrer que $\mathbb{B}^3$ et $\mathbb{R}^3$ sont homotopiquement équivalents mais pas homéomorphes.

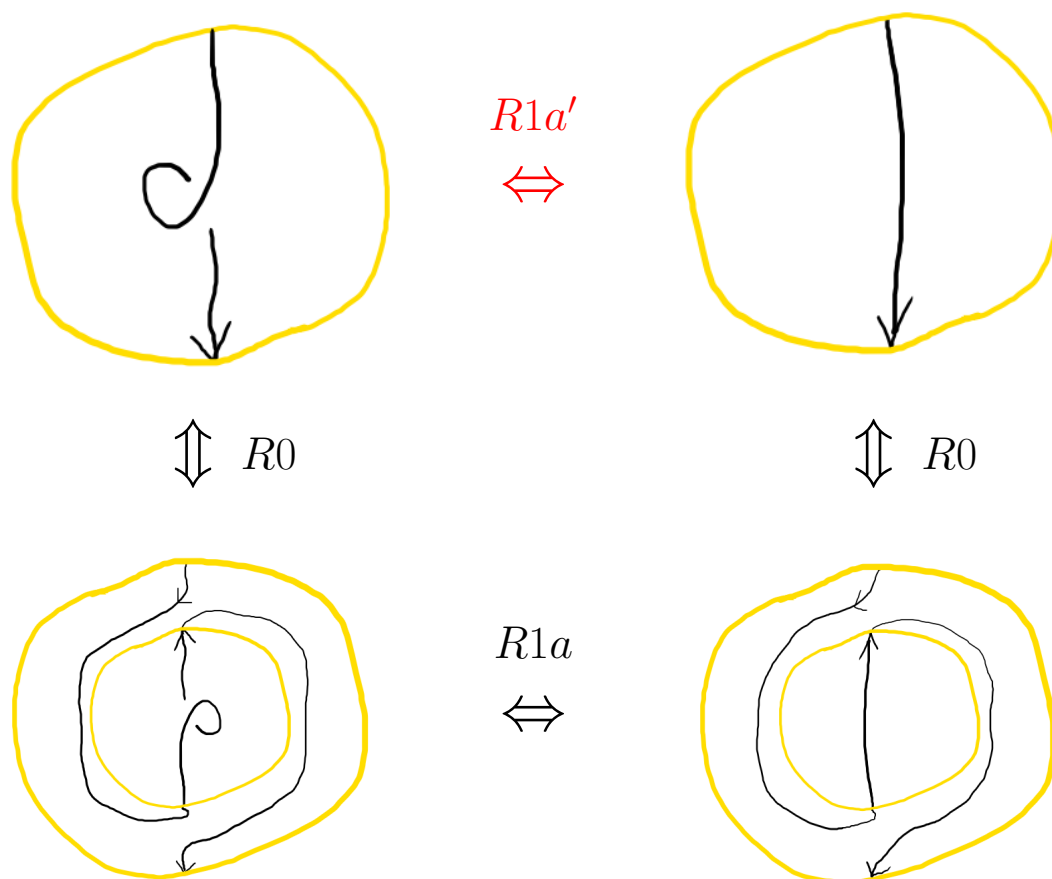
(2) Montrer que $\mathbb{B}^3$ et $\mathbb{S}^3$ ne sont pas homotopiquement équivalents.

Exercice 1.B. Prenons J le nœud trivial donné par un cercle unité orienté, et K le cercle muni de l'orientation inverse.

(1) Montrez qu'il existe une isométrie de $\mathbb{R}^3$ respectant l'orientation et envoyant J sur K (on pourra utiliser des rotations et translations).

(2) En déduire que J et K sont équivalents.

Exercice 1.C. (1) En vous aidant de dessins et en raisonnant comme dans le dessin ci-dessous, montrer que quitte à composer avec un mouvement de type $R0$, il n'existe qu'au plus 4 sortes différentes de mouvements de type $R1$, au plus 4 de type $R2$ et au plus 8 de type $R3$, tous étant dessinés dans la feuille jointe et dans les notes de cours.



(2) Question plus ouverte : montrer que les 16 cas $R1a, \dots, R3h$ sont tous différents, i.e. qu'il n'en existe pas deux équivalents via composition par des isotopies planaires.

Exercice 1.D. Considérons un diagramme de nœud D orienté, à n croisements. Montrer que D délimite le plan en $n + 2$ régions (homéomorphes à quoi ?). On pourra utiliser la caractéristique d'Euler-Poincaré de $\mathbb{S}^2$.

Exercice 1.E. Soit K un nœud et $-K$ son inverse. En utilisant la Définition A, montrer que $\Delta_{-K}(t) \doteq \Delta_K\left(\frac{1}{t}\right)$.

Exercice 1.F. Dans la Définition A, en admettant l'invariance par changement de paires de régions adjacentes, montrer l'invariance de $\det(A')$ par $R1b$, $R2a$ et $R3a$.

Exercice 1.G. En utilisant la Définition A, pour tous les entiers $q \geq 1$ impairs, calculer le polynôme d'Alexander $\Delta_{T(2,q)}(t)$ du nœud torique $T(2, q)$.

Exercice 1.H. En utilisant la Définition A, montrer que le polynôme d'Alexander est multiplicatif pour la somme connexe des nœuds, i.e. pour tous nœuds J et K , on a

$$\Delta_{J \# K}(t) \doteq \Delta_J(t) \cdot \Delta_K(t).$$

On pourra commencer par chercher, dans un diagramme de somme connexe, une paire de régions adjacentes particulièrement appropriée.

Exercice 1.I. Soit $L = (L_1, L_2)$ un entrelacs à deux composantes de diagramme D et $L' := L_1 \sqcup L_2$.

(1) Montrer qu'il existe une famille de croisements de D entre L_1 et L_2 tels que si l'on inverse les signes de ces croisements, on obtient un diagramme D' de L' .

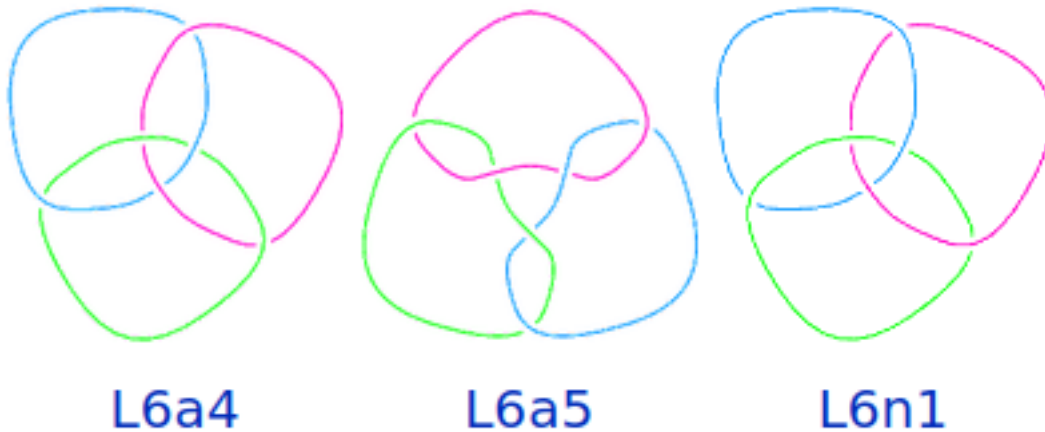
(2) Montrer que changer le signe d'un croisement ne change pas la parité de

$$\sum_{\substack{c \text{ croisement} \\ \text{entre } L_1 \text{ et } L_2}} \epsilon(c).$$

(3) Calculer le nombre d'enlacement de L' .

(4) Conclure que le nombre d'enlacement de L est entier.

Exercice 1.J. Calculer les matrices d'enlacement des 3 entrelacs premiers à 3 composantes et 6 croisements (cf Thistlethwaite Link Table et dessin ci-dessous).



1.6. Solutions des exercices.

Exercice 1.A :

(1) Montrer que $\mathbb{B}^3$ et $\mathbb{R}^3$ sont homotopiquement équivalents mais pas homéomorphes.

(2) Montrer que $\mathbb{B}^3$ et $\mathbb{S}^3$ ne sont pas homotopiquement équivalents.

(1) Les espaces $\mathbb{B}^3$ et $\mathbb{R}^3$ sont contractibles, donc homotopiquement équivalents à un point, donc sont homotopiquement équivalents. En revanche, $\mathbb{B}^3$ est une boule fermée donc est compacte, alors que $\mathbb{R}^3$ n'est pas compact, donc $\mathbb{B}^3$ et $\mathbb{R}^3$ ne sont pas homéomorphes.

(2) Il suffit de montrer que $\mathbb{S}^3$ n'est pas contractible. Pour cela, on remarque que son troisième groupe d'homologie $H_3(\mathbb{S}^3, \mathbb{Z}) \cong \mathbb{Z}$ est non nul. D'où le résultat.

Exercice 1.B : Prenons J le nœud trivial donné par un cercle unité orienté, et K le cercle muni de l'orientation inverse.

(1) Montrez qu'il existe une isométrie de $\mathbb{R}^3$ respectant l'orientation et envoyant J sur K (on pourra utiliser des rotations et translations).

(2) En déduire que J et K sont équivalents.

(1) Soit C le cercle unité en question, sans orientation. Soit P le plan où vit C , et D une droite de P passant par le centre de C . Soit $r : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ la rotation d'axe D et d'angle π . Cette rotation r laisse P et C globalement invariants, mais si on munit C d'une orientation, r l'envoie sur le même cercle avec l'orientation inverse. En tant que rotation, r est bien une isométrie de $\mathbb{R}^3$ respectant l'orientation de $\mathbb{R}^3$, qui envoie de plus J sur K et vice-versa.

(2) Dans la veine du (1), on peut construire une isotopie ambiante dans $\mathbb{R}^3$ de J à K , en prenant simplement la rotation d'axe D et d'angle $t\pi$ à chaque temps t (c'est bien un difféomorphisme à chaque temps et globalement).

Cependant, il n'est pas évident pourquoi l'extension de cette isotopie ambiante à $\mathbb{S}^3$ (en envoyant bien sûr ∞ sur ∞) est lisse.

Pour démontrer rigoureusement l'équivalence de J et K dans $\mathbb{S}^3$, on peut appliquer le raisonnement précédent sur un voisinage borné du cercle, laisser agir l'identité dans un voisinage de l'infini, et interpoler de manière lisse dans le reste de $\mathbb{S}^3$. Soit ainsi une fonction d'interpolation $\phi : \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow [0, 1]$ lisse, décroissante, constante égale à 1 sur $[0, 2]$ et nulle sur $[3, \infty]$. Pour simplifier, posons les coordonnées de $\mathbb{R}^3$ de façon à ce que C soit le cercle unité de $x0z$ et D la droite verticale $0z$. Soit $F : [0, 1] \times \mathbb{S}^3 \rightarrow \mathbb{S}^3$ telle que pour tout $t \in [0, 1]$, $F(t, \cdot)$ est la rotation d'axe D et d'angle

$$\theta_{t,x,y,z} := \phi(x^2 + y^2)\phi(z^2)t\pi,$$

dans le sens que $F(t, \infty) = \infty$ et

$$F\left(t, \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} \cos(\theta_{t,x,y,z}) & -\sin(\theta_{t,x,y,z}) & 0 \\ \sin(\theta_{t,x,y,z}) & \cos(\theta_{t,x,y,z}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}.$$

Soit G définie comme F mais avec $-\theta_{t,x,y,z}$ au lieu de $\theta_{t,x,y,z}$. Alors il est clair que $F(t, \cdot)$ et $G(t, \cdot)$ sont inverses l'une de l'autre.

D'autre part, montrons que $F(t, \cdot)$ et $G(t, \cdot)$ sont toutes lisses et respectent l'orientation. Sur le voisinage ouvert V de ∞ composé des (x, y, z) tels que $x^2 + y^2 > 3$ ou $z^2 > 3$, elles agissent comme l'identité (qui est lisse et respecte l'orientation). D'autre part, sur un voisinage borné ouvert U de 0 tel que $U \cup V = \mathbb{S}^3$, $F(t, \cdot)$ et $G(t, \cdot)$ sont lisses par composition et produit de fonctions lisses, et respectent l'orientation similairement aux rotations.

Enfin, F est lisse par une décomposition en cartes et des arguments similaires à ceux du paragraphe précédent.

Exercice 1.C

- (1) *En vous aidant de dessins et en raisonnant comme ci-dessus, montrer qu'au sens de la Remarque 1.16, il n'existe qu'au plus 4 sortes différentes de mouvements de type $R1$, au plus 4 de type $R2$ et au plus 8 de type $R3$, tous étant dessinés respectivement dans les Figures 12, 13 et 14.*
- (2) *Question plus ouverte : montrer que les 16 cas des Figures 12, 13 et 14 sont tous différents, i.e. qu'il n'en existe pas deux équivalents via composition par des isotopies planaires.*

(1) Les 4 autres mouvements de type $R1$ pas sur la Figure 12 (avec la boucle à gauche) sont obtenus via le même type d'isotopie planaire que pour $R1a'$, à savoir une interpolation avec un demi-tour.

Pour le type $R2$, les 4 mouvements pas sur la Figure 13 ont tous le brin de droite passant au-dessus et non le gauche, et sont obtenus encore une fois par un tel demi-tour.

Pour le type $R3$, commençons par remarquer que les 8 mouvements de la Figure 14 réunissent tous les cas où le brin horizontal passe au-dessus du croisement et est orienté de droite à gauche (4 possibilités pour les orientations des deux autres brins et 2 pour le signe du croisement entre eux).

Considérons une configuration où le brin horizontal passe toujours au-dessus du croisement, mais est orienté vers la droite. Alors via un demi-tour et un échange des deux côtés de l'équivalence, on retombe sur un des 8 mouvements de la Figure 14.

Enfin, si l'on prend une des 16 configurations où le brin horizontal passe en-dessous du croisement, alors via une rotation de $\pm\frac{\pi}{3}$ et un échange des deux côtés de l'équivalence, on se ramène à un cas d'un des deux paragraphes précédents.

(2) Pour le type $R1$, le signe du croisement de la boucle distingue $R1a$ et $R1b$ (positif) de $R1c$ et $R1d$ (négatif), car ce signe ne change pas par isotopie planaire. On distingue $R1a$ de $R1b$ en considérant si le lacet de la boucle commence ou finit par un passage au-dessus, et on distingue similairement $R1c$ de $R1d$.

Pour le type $R2$, regardons les disques avec 2 croisements. Une isotopie planaire ne change pas le nombre de brins orientés partant de chaque croisement pour arriver à l'autre, ce qui distingue $R2a$ et $R2b$ (deux départs du même croisement) de $R2c$ et $R2d$ (un départ de chaque croisement). D'autre part, les signes des croisements rencontrés dans l'ordre en suivant les orientations des brins (ordre de signes qui ne change pas par isotopie planaire) sont différents pour $R2a$ (positif puis négatif) et pour $R2b$ (négatif puis positif). Un argument similaire sur le brin du dessus distingue $R2c$ et $R2d$.

Pour le type $R3$, remarquons qu'une isotopie planaire sur une configuration triangulaire (à gauche ou à droite de l'équivalence) ne peut pas permuter les "altitudes" des brins (lequel passe au-dessus deux fois, etc.). Appelons-les donc les brins haut, médian et bas. D'autre part, une isotopie planaire ne peut pas changer le signe du croisement entre deux brins spécifiques. De plus, le mouvement $R3$ ne change pas non plus la nature des brins et les signes des croisements respectifs. Enfin, les 8 mouvements de la Figure 14 ont tous des triplets ordonnés de signes différents (ordonnés par exemple par le croisement haut-médian, puis le médian-bas, puis le haut-bas). D'où le résultat.

Exercice 1.D : Montrer que D délimite le plan en $n + 2$ régions homéomorphes à des disques. On pourra utiliser la caractéristique d'Euler-Poincaré de $\mathbb{S}^2$.

Notons r le nombre de régions, et montrons que $r = n + 2$. Considérons D comme une immersion d'une union de cercles, donc chaque croisement est vu comme un point.

Le plan compactifié $\mathbb{S}^2$ admet donc une décomposition cellulaire en n points (un pour chaque croisement), b brins entre des points, et r régions homéomorphes à des disques (point important). Le fait que toutes les régions sont contractiles est dû au fait que D n'est pas un diagramme d'entrelacs scindé (mais d'un nœud).

Quatre demi-brins partent de chaque croisement, donc $2b = 4n$, donc $b = 2n$.

D'autre part, la caractéristique d'Euler-Poincaré de $\mathbb{S}^2$ est 2, donc $n - b + r = 2$, donc $r = 2 - n + 2n = n + 2$.

Exercice 1.E : Démontrer la Proposition 1.27.

Soit K un nœud de diagramme D . Alors $-K$ a pour diagramme D' , obtenu depuis D en changeant le sens de parcours de tous les brins. Ainsi, la répartition des coefficients autour de chaque croisement change suivant la Figure 23.

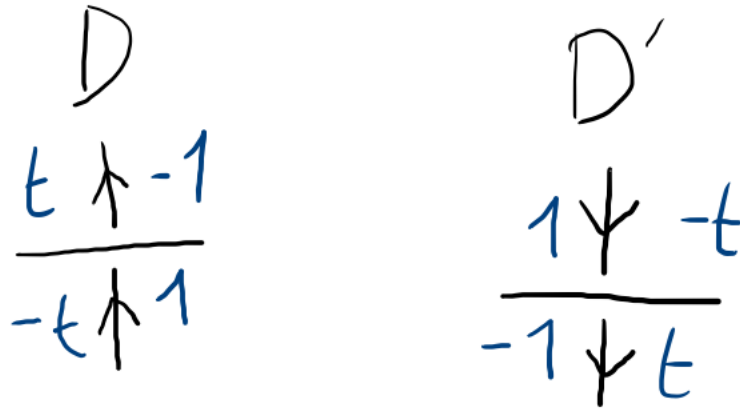


FIGURE 23. Coefficients autour d'un croisement

Ainsi, on remarque (ligne par ligne) que $\frac{1}{t}A(D')$ est égale à la matrice $A(D)$ où la variable t est remplacé par $\frac{1}{t}$.

Donc, en notant R_j, R_k deux régions adjacentes de D (ou D'), on a bien

$$\Delta_K \left(\frac{1}{t} \right) \doteq \det \left(\frac{1}{t} A(D')_{j,k} \right) \doteq \det (A(D')_{j,k}) \doteq \Delta_{-K}(t).$$

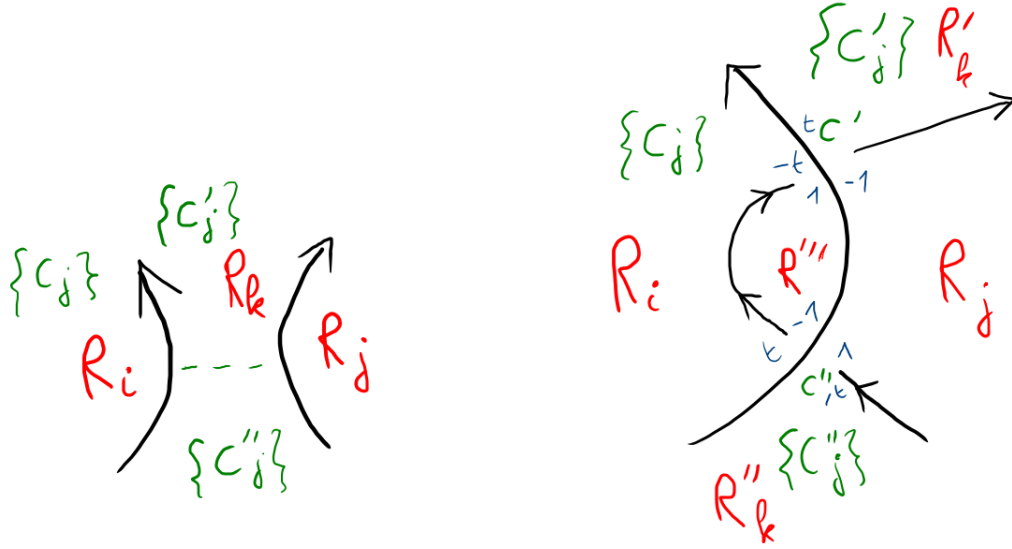
Exercice 1.F : Compléter la démonstration du Théorème 1.26 en montrant l'invariance par R1b, R2a et R3a.

L'invariance par R1b se démontre exactement comme pour R1a, en laissant la colonne correspondant à la nouvelle région R' .

Pour R2a, on choisit les diagrammes, les croisements et les régions comme dans la Figure 24. On note c_l (avec un indice abstrait l) les croisements ne touchant pas la région R_k , c'_l ceux touchant R_k en haut des pointillés (ou touchant R'_k) et c''_l les autres. On note c' et c'' les nouveaux croisements.

Parmi les régions de noms différents sur la Figure 24, seules R'_k et R''_k ont même indice et peuvent potentiellement être connectées hors du disque considéré. Montrons cependant par l'absurde qu'elles sont bien distinctes.

Supposons $R'_k = R''_k$. Alors il existe un chemin γ' entre elles en dehors du voisinage de D' de la Figure 24, auquel correspond un chemin γ immédiat sur le diagramme D connectant deux points de R_k de part et d'autre de la ligne horizontale verte pointillée. On peut alors connecter ces deux mêmes points par un chemin δ transverse à la ligne pointillée et entièrement inclus dans la Figure 24. L'union $C = \gamma \cup \delta$ est alors un cercle plongé dans le plan, qui n'intersecte pas D , et qui sépare deux parties non vides du diagramme D . Mais alors D n'est pas connexe, ce qui contredit le fait qu'il est un diagramme de *nœud*.

FIGURE 24. Invariance par $R2a$ (diagramme D à gauche, D' à droite)

La matrice associée au diagramme D à gauche de la Figure 24 est

$$A(D) = \begin{matrix} & \{R_l\}_l & R_i & R_j & R_k \\ \begin{matrix} \{c_l\}_l \\ \{c'_l\}_l \\ \{c''_l\}_l \end{matrix} & \begin{bmatrix} B & C & D & 0 \\ E & F & G & \star \\ H & I & J & \square \end{bmatrix} \end{matrix},$$

donc en retirant les colonnes des régions adjacentes R_j, R_k , on obtient le déterminant $\det \begin{pmatrix} B & C \\ E & F \\ H & I \end{pmatrix}$.

D'autre part, la matrice associée au diagramme D' à droite de la Figure 24 est

$$A(D') = \begin{matrix} & \{R_l\}_l & R_i & R_j & R'_k & R''_k & R'''_k \\ \begin{matrix} \{c_l\}_l \\ \{c'_l\}_l \\ \{c''_l\}_l \\ c' \\ c'' \end{matrix} & \begin{bmatrix} B & C & D & 0 & 0 & 0 \\ E & F & G & \star & 0 & 0 \\ H & I & J & 0 & \square & 0 \\ 0 & -t & -1 & t & 0 & 1 \\ 0 & t & 1 & 0 & -t & -1 \end{bmatrix} \end{matrix},$$

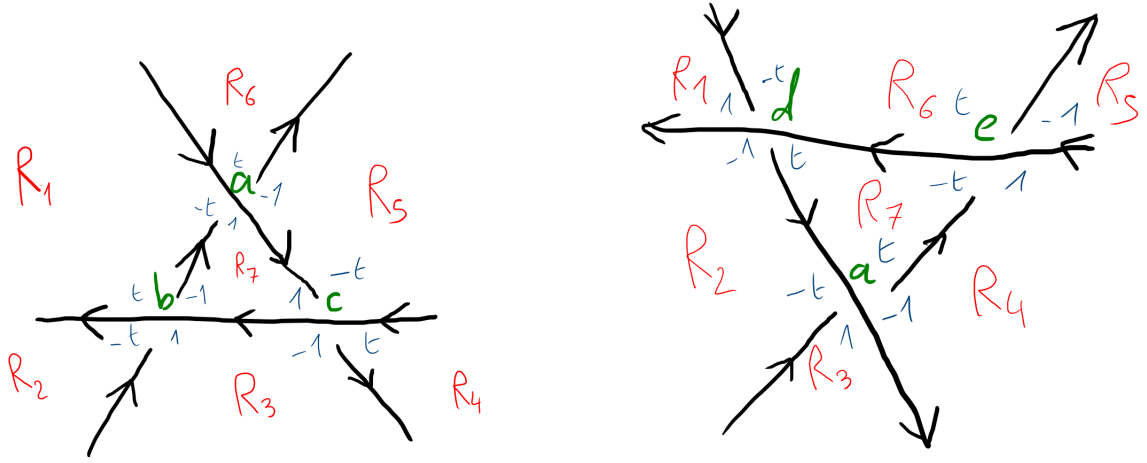
donc en retirant les colonnes des régions adjacentes R_j, R'_k , on obtient le déterminant

$$\det \begin{pmatrix} B & C & 0 & 0 \\ E & F & 0 & 0 \\ H & I & \square & 0 \\ 0 & -t & 0 & 1 \\ 0 & t & -t & -1 \end{pmatrix}. \text{ Par opérations élémentaires, on calcule finalement :}$$

$$\det \begin{pmatrix} B & C & 0 & 0 \\ E & F & 0 & 0 \\ H & I & \square & 0 \\ 0 & -t & 0 & 1 \\ 0 & t & -t & -1 \end{pmatrix} = \det \begin{pmatrix} B & C & 0 & 0 \\ E & F & 0 & 0 \\ H & I & \square & 0 \\ 0 & -t & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -t & 0 \end{pmatrix} = -\det \begin{pmatrix} B & C & 0 \\ E & F & 0 \\ H & I & \square \\ 0 & 0 & -t \end{pmatrix} = t \det \begin{pmatrix} B & C \\ E & F \\ H & I \end{pmatrix},$$

ce qui montre l'invariance (au sens $\doteq$).

Montrons l'invariance par $R3a$. On adopte les notations de la Figure 25.

FIGURE 25. Invariance par $R3a$ (diagramme D à gauche, D' à droite)

Les matrices A et A' construites depuis les diagrammes D et D' de la Figure 25 sont :

$$A = \begin{matrix} & \{R_l\}_l & R_1 & R_2 & R_3 & R_4 & R_5 & R_6 & R_7 \\ \begin{matrix} \{c_l\} \\ a \\ b \\ c \end{matrix} & \begin{bmatrix} B & C & D & E & F & G & H & 0 \\ 0 & -t & 0 & 0 & 0 & -1 & t & 1 \\ 0 & t & -t & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & t & -t & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix},$$

$$A' = \begin{matrix} & \{R_l\}_l & R_1 & R_2 & R_3 & R_4 & R_5 & R_6 & R_7 \\ \begin{matrix} \{c_l\} \\ a \\ d \\ e \end{matrix} & \begin{bmatrix} B & C & D & E & F & G & H & 0 \\ 0 & -t & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & t \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -t & t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & t & -t \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

Notons $L_a, \dots$ (resp. $L'_a, \dots$) les lignes de A (resp. A'). Alors après les opérations élémentaires

$$\begin{aligned} L_a &\leftarrow L_a + L_b & L'_a &\leftarrow L'_a + L'_e \\ L_b &\leftarrow L_c + L_b & \text{resp. } L'_d &\leftarrow t(L'_d + L'_e) \\ L_c &\leftarrow L_b & L'_e &\leftarrow \frac{1}{t}L'_e \end{aligned}$$

les matrices A et A' deviennent toutes deux de la forme

$$\begin{pmatrix} B & C & D & E & F & G & H & 0 \\ 0 & 0 & -t & 1 & 0 & -1 & t & 0 \\ 0 & t & -t & 0 & t & -t & 0 & 0 \\ 0 & * & * & * & * & * & * & -1 \end{pmatrix},$$

donc leur retirer la même paire de colonnes R_1, R_2 et prendre le déterminant donnera le même polynôme à $\pm$ près (via développement par rapport à la dernière colonne R_7). D'où l'invariance.

Exercice 1.G : Pour tous les entiers $q \geq 1$ impairs, calculer le polynôme d'Alexander $\Delta_{T(2,q)}(t)$.

On complète le diagramme de la Figure 22 comme à la Figure 26, et on trouve la matrice A suivante :

$$A = \begin{matrix} & R_0 & R_1 & R_2 & \dots & R_q & R_{q+1} \\ \begin{matrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_q \end{matrix} & \begin{bmatrix} t & -t & -1 & \dots & 0 & 1 \\ t & 0 & -t & \dots & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ t & -1 & 0 & \dots & -t & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

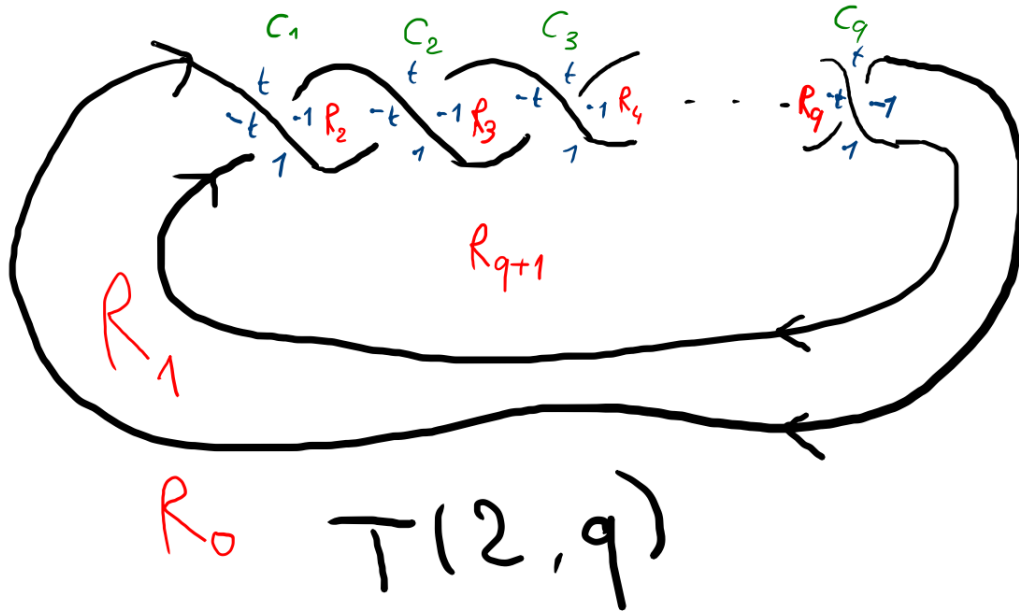


FIGURE 26. Calculer le polynôme d'Alexander du nœud torique $T(2, q)$

En retirant les colonnes R_0 (d'indice 0) et R_{q+1} (d'indice -2), la Proposition 1.30 implique :

$$\Delta_{T(2,q)}(t) \doteq \frac{t-1}{t^2-1} \det(A_{0,q+1}) = \frac{\det(A_{0,q+1})}{t+1}.$$

Or un développement par rapport à la colonne R_1 donne immédiatement

$$\det(A_{0,q+1}) = (-t)^q + (-1)^{q+1}(-1)(-1)^{q-1} = -t^q - 1.$$

$$\text{D'où } \Delta_{T(2,q)}(t) \doteq \frac{t^q + 1}{t + 1} = t^{q-1} - t^{q-2} + \dots + t^2 - t + 1.$$

En retirant les colonnes R_0 et R_1 venant de régions adjacentes, on peut utiliser la Définition A directement et trouver le même résultat.

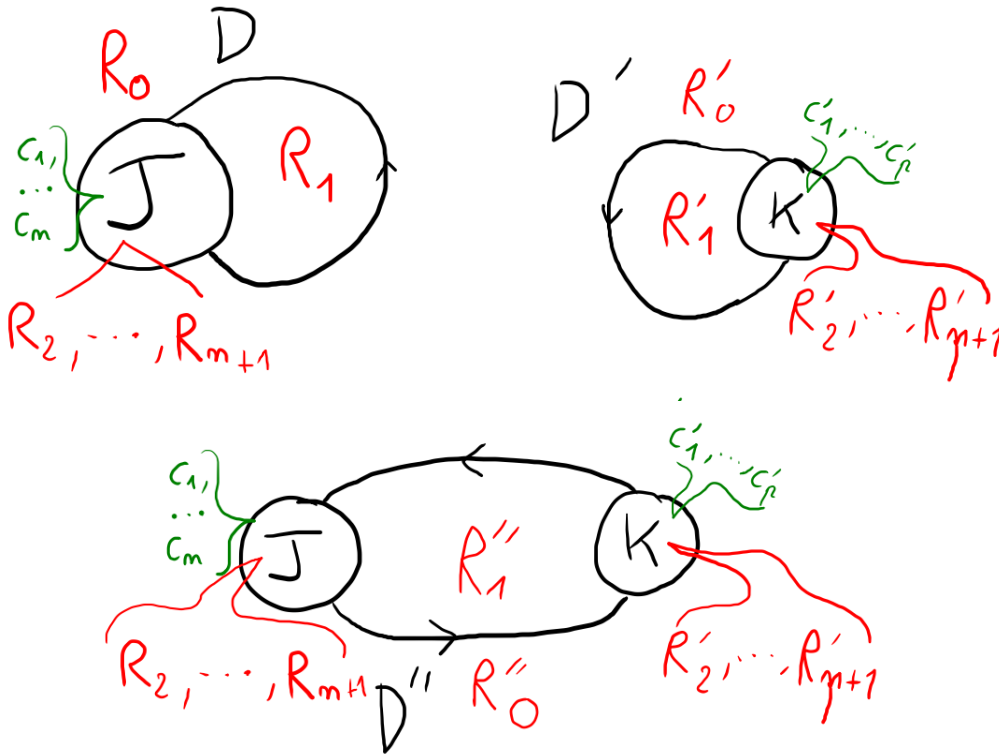
Exercice 1.H : Prouver la Proposition 2.9. On pourra commencer par chercher, dans un diagramme de somme connexe, une paire de régions adjacentes particulièrement appropriée.

Soient J, K des nœuds de diagrammes D et D' de sorte que $J \sharp K$ ait un diagramme D'' obtenu depuis l'union disjointe de D et D' comme dans la Définition 2.4 (voir Figure 27). Notons $c_1, \dots, c_n, R_0, \dots, R_{n+1}$ les croisements et régions de D , et $c'_1, \dots, c'_p, R'_0, \dots, R'_{p+1}$ ceux de D' , comme sur la Figure 27. Alors D'' admet les croisements $c_1, \dots, c_n, c'_1, \dots, c'_p$ et les régions $R''_0, R''_1, R_2, \dots, R_{n+1}, R'_2, \dots, R'_{p+1}$.

Alors la matrice $A(D'')_{R''_0, R'_1}$ construite avec la Définition A en retirant les colonnes des régions R''_0, R'_1 est la somme directe des matrices $A(D)_{0,1}$ et $A(D')_{0,1}$, donc son déterminant est le produit des leurs, d'où le résultat.

Exercice 1.I : Soit $L = (L_1, L_2)$ un entrelacs à deux composantes de diagramme D et $L' := L_1 \sqcup L_2$.

- (1) *Montrer qu'il existe une famille de croisements de D entre L_1 et L_2 tels que si l'on inverse les signes de ces croisements, on obtient un diagramme D' de L' .*

FIGURE 27. Diagrammes D, D', D'' des nœuds $J, K, J\#K$

(2) Montrer que changer le signe d'un croisement ne change pas la parité de

$$\sum_{\substack{c \text{ croisement} \\ \text{entre } L_1 \text{ et } L_2}} \epsilon(c).$$

(3) Calculer le nombre d'enlacement de L' .

(4) Conclure que le nombre d'enlacement de L est entier.

(1) Intervertissons des croisements mixtes de D de façon à ce que le brin de L_1 passe toujours au-dessus de celui de L_2 , et appelons D' le diagramme obtenu. Alors on peut construire un entrelacs à partir de D' en suivant la méthode du cours, mais en envoyant la partie de D' correspondant à L_1 sur des altitudes 1 à $1 - \epsilon$ (autour des croisements internes à L_1) et l'autre sur des altitudes 0 à $-\epsilon$ comme d'habitude. ainsi on obtient un entrelacs scindé (pour $\epsilon < \frac{1}{2}$) qui est bien équivalent à L' .

(2) Changer un signe ajoute ou retranche 2 à la somme, donc ne change pas sa parité.

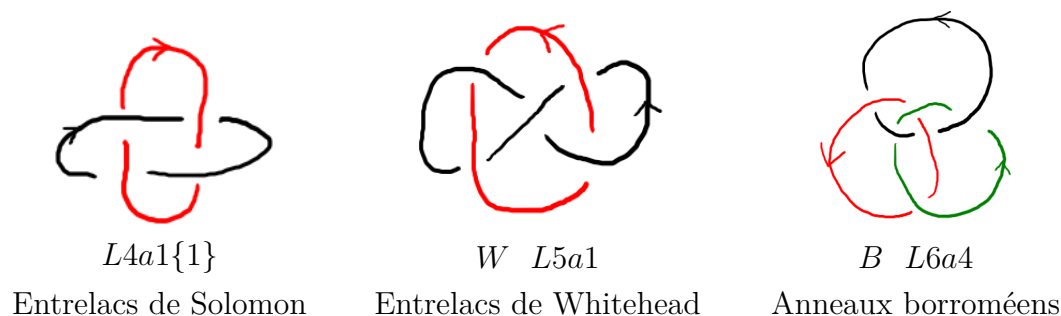
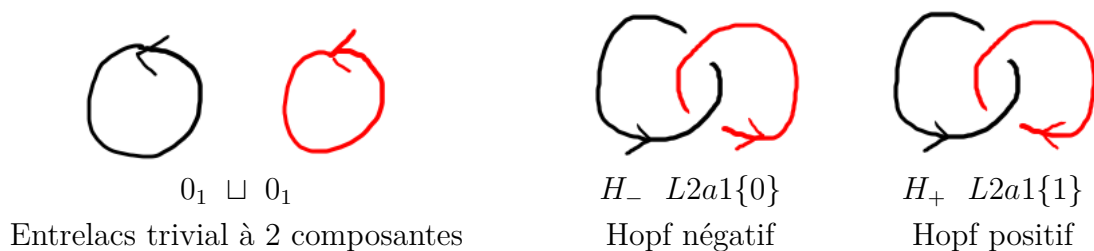
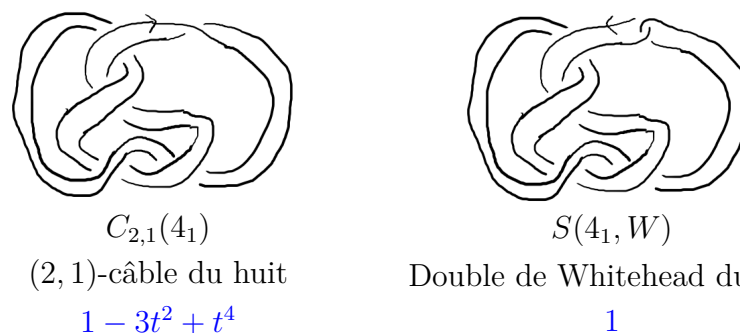
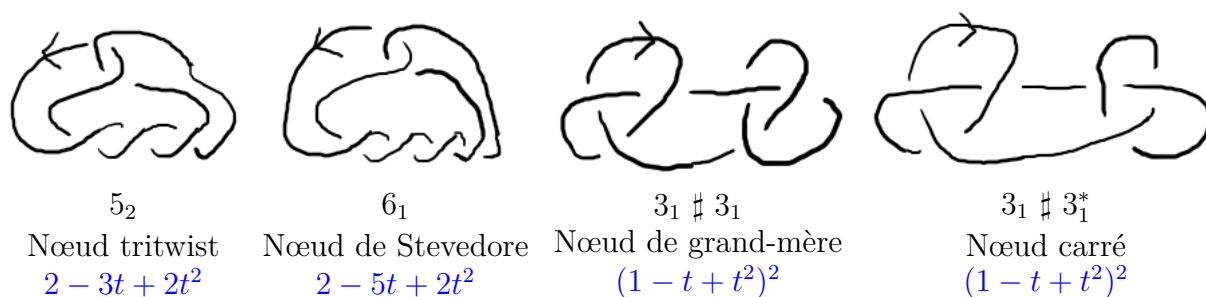
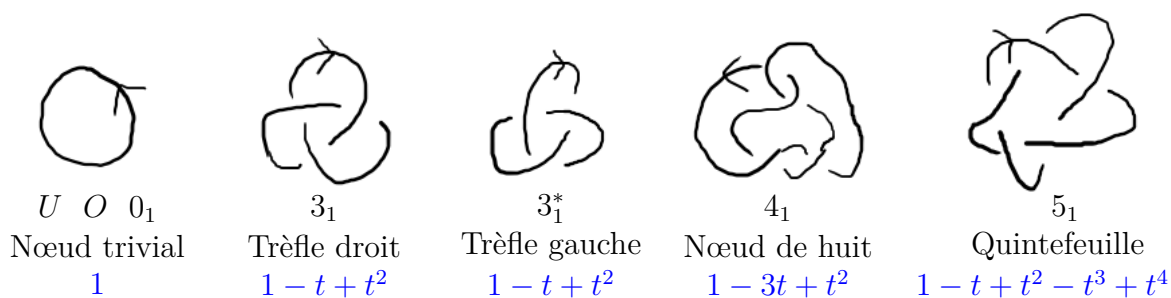
(3) Comme L' est scindé, il admet un diagramme sans croisements entre ses deux composantes, donc $\text{lk}(L') = 0$.

(4) Il suit du (3) que la somme du (2) est nulle pour le diagramme D' , donc elle est paire. Par le (2), elle reste paire en changeant des signes de D' . Il découle donc du (1) que cette somme est paire pour D , donc que sa moitié est un nombre entier.

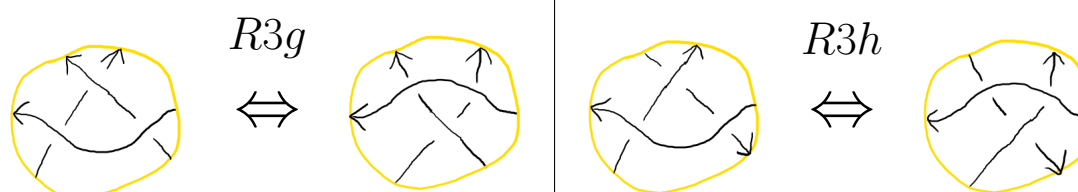
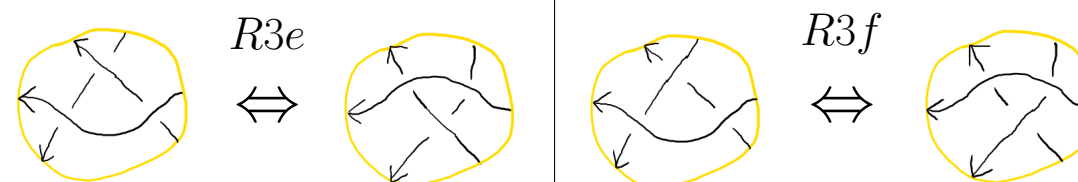
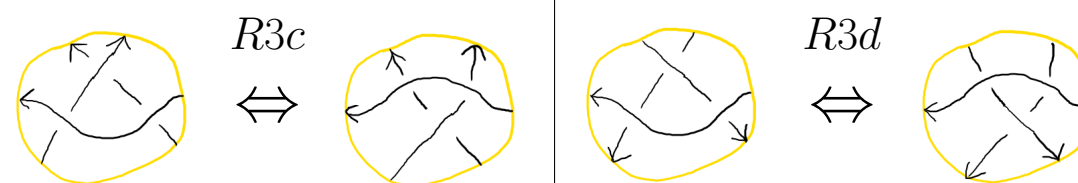
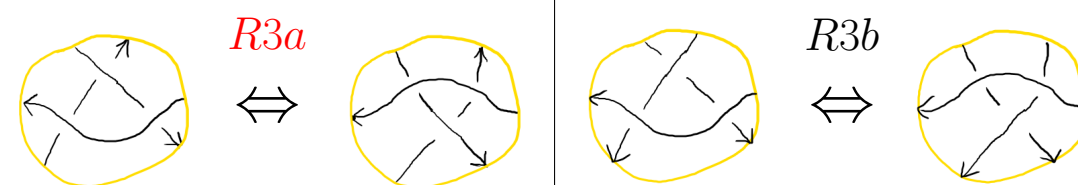
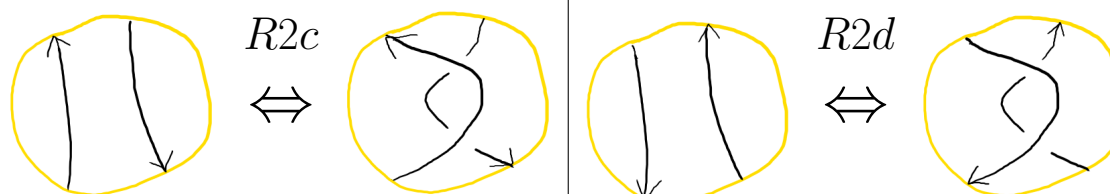
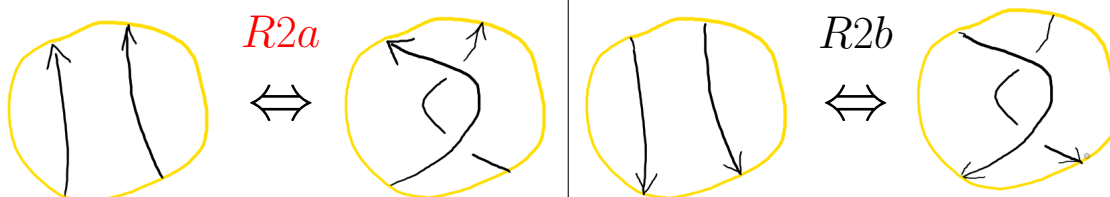
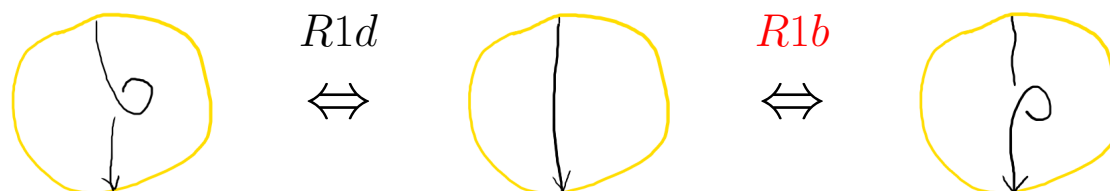
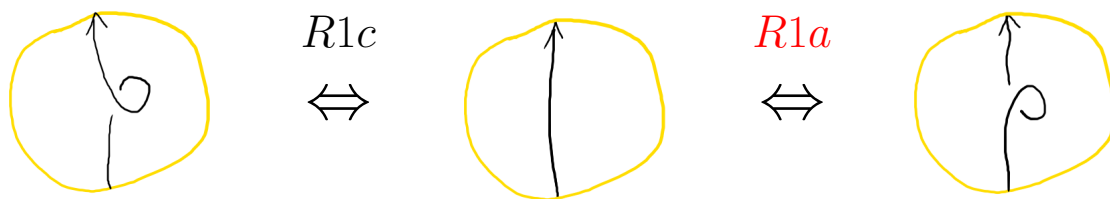
Exercice 1.J : Calculer les matrices d'enlacement des entrelacs de la Figure 3.

$\text{lk}(0_1 \sqcup 0_1) = 0$, $\text{lk}(H_-) = -1$, $\text{lk}(H_+) = 1$, $\text{lk}(L4a1\{1\}) = 2$, $\text{lk}(W) = 0$, et $\text{Lk}(B)$ est la matrice nulle de taille 3.

Notations et noms de quelques nœuds et entrelacs, et
premières valeurs du polynôme d'Alexander $\Delta_K(t)$ (en **bleu**)



Mouvements de Reidemeister (à R0 près), **Quatuor de Polyak-Suwara**



2. RELATIONS SKEIN ET DÉFINITION X

2.1. Lire une table de nœuds. La Figure 3 illustre beaucoup de notations et d'exemples caractéristiques qu'il est utile de connaître pour s'y retrouver dans les différentes tables et dénominations de la littérature (comme *Knot Atlas*, *Knotinfo*, *Linkinfo*, etc.). Le but de cette section est de définir et clarifier la plupart de ces notions, sans nécessairement en donner des définitions complètes et rigoureuses (celles-ci viendront dans les chapitres suivants).

Définition 2.1. Le *nombre de croisements* (*crossing number*) $c(L)$ d'un entrelacs L est le nombre minimum de croisements que peut avoir un diagramme de L , et c'est un invariant d'entrelacs.

Il est aisé d'en trouver des bornes supérieures par l'exemple, mais difficile de le calculer exactement. Ce nombre est néanmoins le premier critère utilisé pour lister les entrelacs.

La *somme connexe* $J \# K$ des nœuds J, K est obtenue en retirant un segment à chacun et en connectant les courbes restantes en une seule composante connexe d'une manière cohérente avec les orientations (voir les exemples sur la Figure 3). On peut se convaincre qu'à équivalence près, $J \# K$ ne dépend pas des endroits précis de J et K où ces coupures et recollements sont faits.

Un nœud est *composé* s'il est égal à la somme connexe de deux nœuds non triviaux, et *premier* sinon. On peut démontrer que la décomposition d'un nœud en facteurs premiers (non triviaux) est unique à l'ordre près. Ainsi, "il suffit" de classer et nommer les nœuds premiers.

Les notions de somme connexe et de primalité s'appliquent également aux entrelacs, mais on doit alors spécifier sur quelle composante de chaque entrelacs a lieu le recollement, ce qui complexifie également les notations.

Un nœud premier sera noté k_d s'il est le d -ème nœud premier de nombre de croisements k . Les critères pour ordonner les nœuds premiers ayant le même nombre de croisements sont plus obscurs.

Définition 2.2. Un entrelacs est *alterné* s'il admet un *diagramme alterné*, i.e. un diagramme où en suivant n'importe quelle composante on passe les croisements successifs par dessus et par dessous en alternance.

Pour $k = 11, 12$, on rajoute un **a** ou un **n** en indice, comme 11_{n74} , pour préciser si le nœud est **alterné** ou **non**.

Pour les entrelacs de deux composantes ou plus, on utilise la notation $L k a d$ ou $L k n d$ de *Linkinfo*, où k, d, a, n ont le même sens que pour les nœuds.

Pour les entrelacs à deux composantes, un $\{0\}$ ou $\{1\}$ à la fin de la notation traduit un changement d'orientation d'une des composantes mais pas de l'autre (pour les nœuds on peut se contenter d'ajouter le signe $-$ avant le nom, cf Définition 1.6). Pour un entrelacs à μ composantes, il y aura $\mu - 1$ valeurs 0 ou 1 entre les accolades, avec une signification similaire.

L'*image miroir* d'un entrelacs L est notée L^* et est l'image de L par une réflexion planaire de $\mathbb{R}^3$ (à équivalence d'entrelacs près, peu importe la réflexion choisie). Sur un diagramme d'entrelacs, prendre l'image miroir revient à remplacer tous les croisements positifs par des négatifs et vice-versa.

Définition 2.3. L'*union disjointe* $L \sqcup L'$ des entrelacs L et L' est obtenu de la manière suivante : prenons des représentants de $[L]$ et $[L']$ inclus respectivement dans deux boules $\mathbb{B}^3$ disjointes dans $\mathbb{S}^3$; $L \sqcup L'$ est alors l'union disjointe (au sens ensembliste) de ces deux représentants. Un entrelacs L est *scindé* (*split*) s'il s'écrit comme une union disjointe de deux entrelacs. En général on préfère travailler avec des entrelacs non-scindés.

2.2. Somme connexe de nœuds. Formalisons la notion de somme connexe de deux nœuds, qui correspond à retirer un petit morceau à chacun et à les relier (sans nouage additionnel) en respectant les orientations.

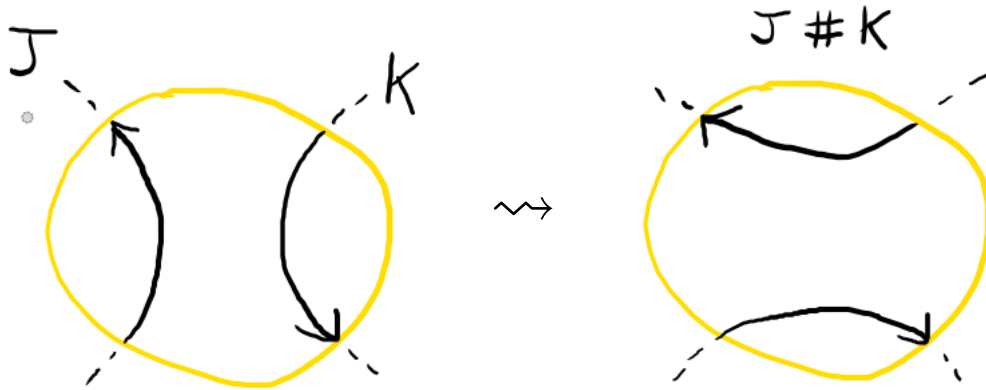


FIGURE 28. Passer de l'union disjointe $J \sqcup K$ à la somme connexe $J \# K$

Définition 2.4. Soient J, K deux nœuds de $\mathbb{S}^3$. Considérons un diagramme $D_\sqcup$ de leur union disjointe $J \sqcup K$ tel qu'il existe un disque du plan au voisinage duquel $D_\sqcup$ est comme à la gauche de la Figure 28 (resp. ainsi mais avec les orientations opposées), i.e. le disque contient un brin sans croisements de J et un de K . Alors la *somme connexe* $J \# K$ de J et K (ou *produit*, ou *composition*) est le nœud correspondant au diagramme D obtenu depuis $D_\sqcup$ en remplaçant le disque précédent par celui à droite de la Figure 28 (resp. le même mais avec les orientations opposées).

On admettra que le procédé précédent donne le même résultat peu importe le diagramme et le disque choisis.

Exemple 2.5. Le nœud carré $3_1 \# 3_1^*$ est la somme connexe des trèfles droit et gauche (voir Figure 3 ou ci-après).



Proposition 2.6. La somme connexe $\#$ des nœuds est commutative, associative et admet le nœud trivial U comme élément neutre.

Elle donne donc une structure de monoïde commutatif à l'ensemble des classes d'équivalence de nœuds.

Démonstration. Les deux derniers points découlent immédiatement de la définition. La commutativité se visualise en trois dimensions en faisant glisser un des nœuds le long de l'autre. $\square$

Définition 2.7. Un nœud K est *composé* s'il existe J, J' non triviaux tels que $K = J \# J'$. Un nœud est *premier* s'il n'est pas composé et pas trivial.

Remarque 2.8. On verra plus loin que la décomposition d'un nœud non trivial en somme connexe de nœuds premiers (appelés *facteurs premiers*) existe toujours et est unique à permutation des facteurs premier près, par un théorème dû à H. Schubert.

En particulier, le monoïde des nœuds est *simplifiable* : pour tous nœuds J, J', K , on a :

$$J \sharp K = J' \sharp K \Rightarrow J = J'.$$

Cependant, aucun nœud non trivial n'admet un inverse pour $\sharp$. Le monoïde des nœuds n'est pas un groupe.

Proposition 2.9. *Le polynôme d'Alexander est multiplicatif pour la somme connexe des nœuds, i.e. pour tous nœuds J et K , on a*

$$\Delta_{J \sharp K}(t) \doteq \Delta_J(t) \cdot \Delta_K(t).$$

Exercice (Exercice 1.H ou 2.D). *Prouver la Proposition 2.9. On pourra commencer par chercher, dans un diagramme de somme connexe, une paire de régions adjacentes particulièrement appropriée.*

2.3. Le nombre de dénouement.

Définition 2.10. Le *nombre de dénouement* $u(K) \in \mathbb{N}$ d'un nœud K est le nombre minimum de changements de croisements nécessaires pour passer d'un diagramme de K à un diagramme de U .

C'est un invariant, consultable sur *Knotinfo*.

Remarque 2.11. Il découle immédiatement des définitions que $u(K) = 0$ si et seulement si $K = U$.

Vu que u est défini comme une borne inférieure, c'est donc un invariant difficile à calculer. Ainsi, pour démontrer que $u(K) = 1$, il "suffit" de trouver un diagramme de K transformable en un diagramme de U en un seul changement de croisement, mais pour démontrer que $u(K) = 2$, il faut non seulement trouver un exemple où deux changements de croisements suffisent ($u \leq 2$) mais surtout prouver qu'un seul changement ne suffit dans *aucune configuration* ($u \geq 2$).

Exemple 2.12. (Exercice 2.A) On peut démontrer facilement que

$$u(3_1) = u(4_1) = u(5_2) = u(6_1) = u(S(4_1, W)) = 1,$$

en trouvant un croisement approprié (essayez !)

Les deux propriétés suivantes sont faciles à démontrer.

Proposition 2.13. *Soient J, K des nœuds. Alors on a :*

- (1) $u(-K) = u(K^*) = u(K)$,
- (2) $u(J \sharp K) \leq u(J) + u(K)$.

La propriété suivante sera admise car bien plus difficile. Elle sera utile pour obtenir des bornes inférieures sur u .

Proposition 2.14. *Soit K un nœud. Alors on a : si $u(K) = 1$, alors K est premier.*

Démonstration. Ceci est démontré dans [Scha]. □

Exemple 2.15. (Exercice 2.B) En utilisant la Proposition 2.14 on peut démontrer que

$$u(5_1) = u(3_1 \sharp 3_1) = u(3_1 \sharp 3_1^*) = 2.$$

La question suivante a longtemps été ouverte :

Question 2.16. Pour tous nœuds J, K , a-t-on $u(J \sharp K) = u(J) + u(K)$?

La réponse à la Question 2.16 est connue comme positive dans le cas où $u(J) = u(K) = 1$, en conséquence de Proposition 2.13 (2) et Proposition 2.14 (2).

Cependant, il a été prouvé très récemment (2025) que la réponse est négative ! Dans [BH], Mark Brittenham et Susan Hermiller prouvent le théorème suivant :

Théorème 2.17. *Le nœud $K = 7_1$ vérifie $u(K) = u(K^*) = 3$, mais*

$$2 \leq u(K \sharp K^*) \leq 5.$$

À l'heure actuelle, il est même possible que $u(K \sharp K^*)$ soit égal à 2, soit strictement moins que $u(K) = u(K^*) = 3$!!

2.4. Triplets skein.

Définition 2.18. Un *triplet skein* est un triplet d'entrelacs (L_+, L_-, L_0) qui ont des diagrammes identiques sauf dans un disque, ainsi :



Définition 2.19. On dit qu'un invariant d'entrelacs F (à valeurs dans un anneau R) vérifie une relation skein s'il existe $a, b, c \in R \setminus \{0\}$ tels que pour tout triplet skein (L_+, L_-, L_0) , on a

$$aF(L_+) + bF(L_-) = cF(L_0).$$

Proposition 2.20. *Pour tout diagramme d'entrelacs D , il existe des croisements de D tels qu'en les inversant on obtient un diagramme de $U \sqcup \dots \sqcup U$.*

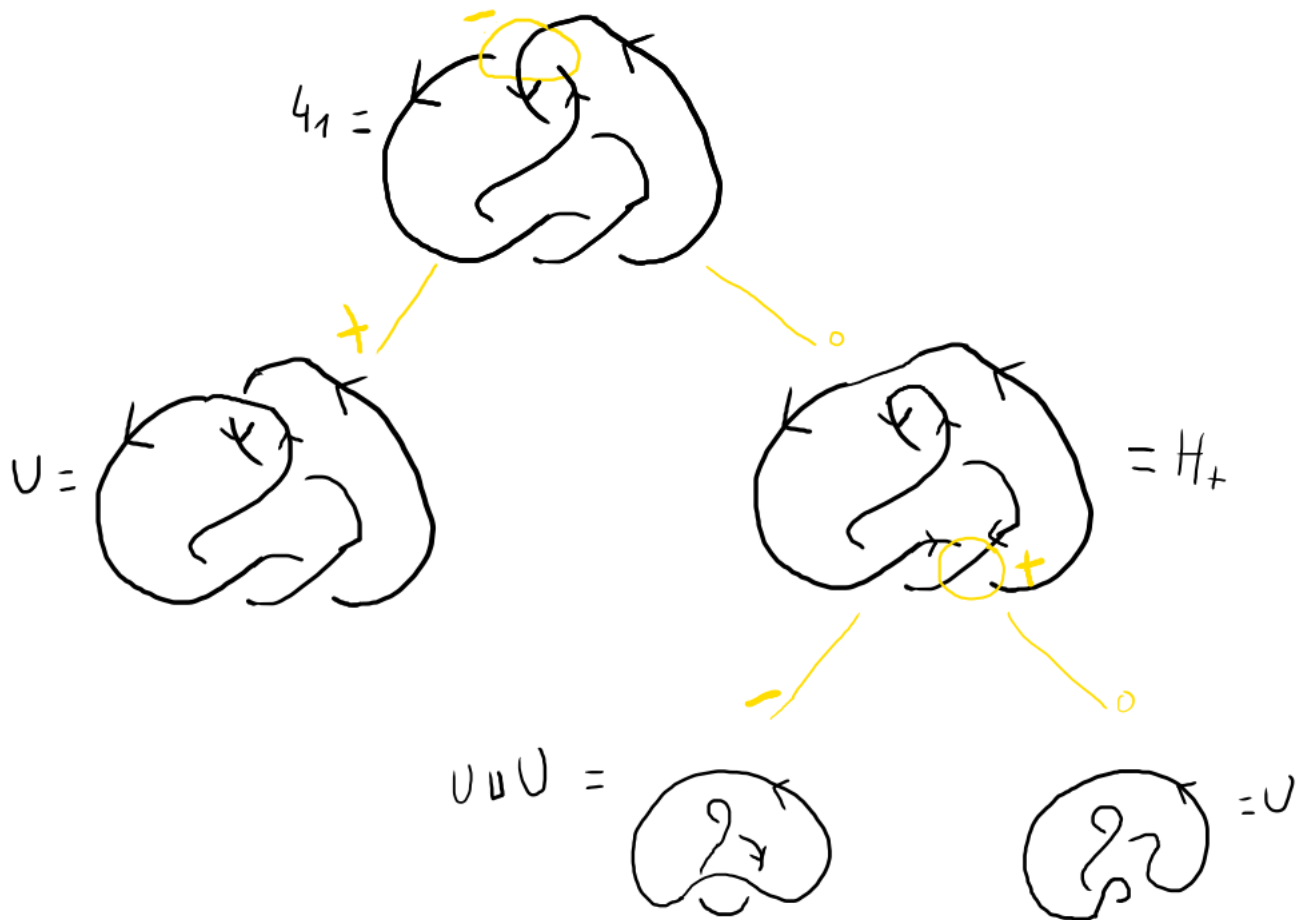
Exercice. (Exercice 2.C) Montrer que pour tout nœud K , on a $u(K) \leq \frac{1}{2}c(K)$.

Ainsi, un invariant d'entrelacs F vérifiant une relation skein sera déterminé par ses valeurs en les entrelacs triviaux (et même juste en U).

Définition 2.21. Un *arbre résolvant* pour L est construit successivement ainsi :

- On commence avec la racine L .
- Pour chaque racine, on l'identifie à un membre L_+ ou L_- d'un triplet skein, les deux autres membres étant les feuilles associées.
- À la fin, toutes les feuilles sont des entrelacs triviaux.

Exemple 2.22. Pour le nœud 4_1 , on peut construire l'arbre résolvant suivant :



2.5. Polynôme de Conway et Définition X.

Définition 2.23 (Définition X). Le *polynôme d'Alexander* des entrelacs $L \mapsto \Delta_L(t) \in \mathbb{Z}[t^{\pm 1/2}]$ est un polynôme de Laurent en $\sqrt{t}$ (**pas défini à priori ici !**) défini par les propriétés suivantes :

- Δ . est un invariant d'entrelacs,
- $\Delta_U = 1$,
- Pour tout triplet skein (L_+, L_-, L_0) , on a

$$\Delta_{L_+}(t) - \Delta_{L_-}(t) = \left(\sqrt{t} - \frac{1}{\sqrt{t}} \right) \Delta_{L_0}(t).$$

Définition 2.24. Le *polynôme de Conway* des entrelacs $L \mapsto \nabla_L(t) \in \mathbb{Z}[z]$ est un polynôme en z défini par les propriétés suivantes :

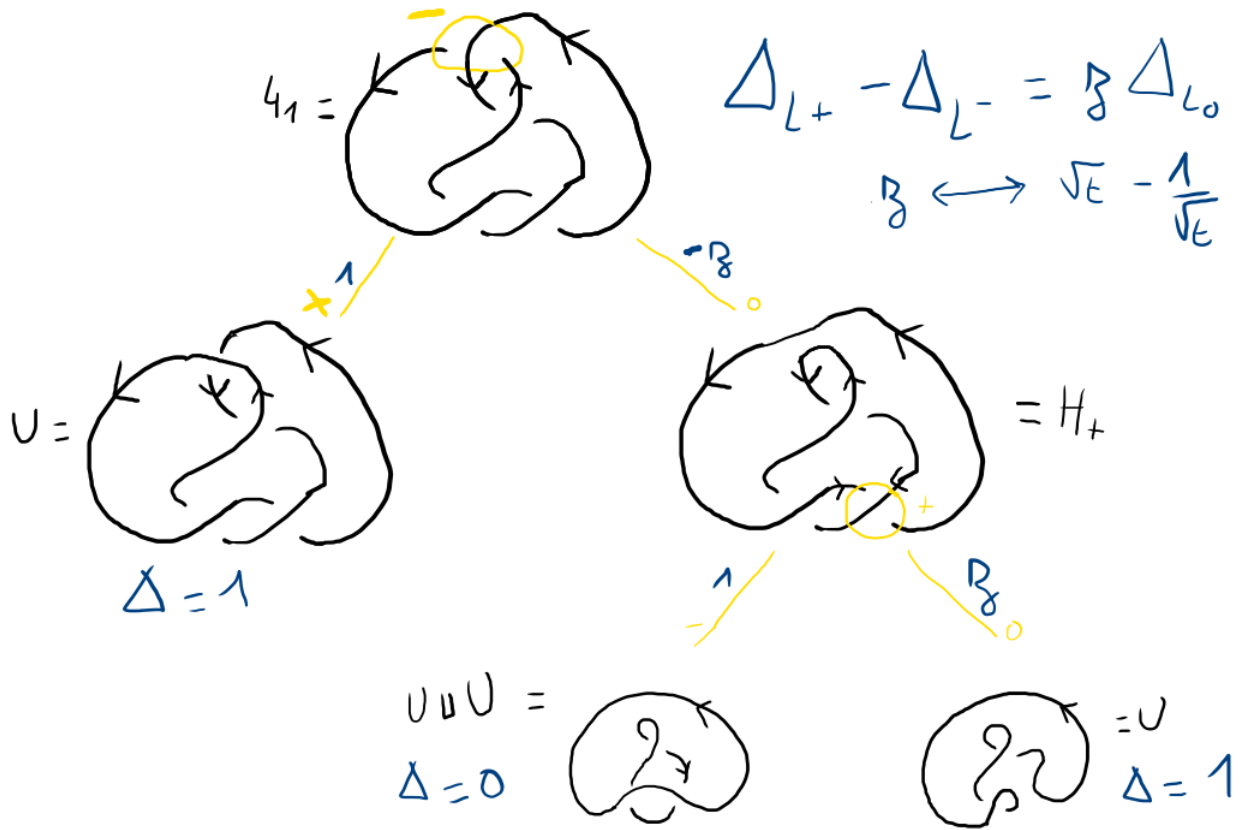
- ∇ . est un invariant d'entrelacs,
- $\nabla_U = 1$,
- Pour tout triplet skein (L_+, L_-, L_0) , on a

$$\nabla_{L_+}(z) - \nabla_{L_-}(z) = z \cdot \nabla_{L_0}(z).$$

Ainsi, $\Delta_L(t) = \nabla_L(\sqrt{t} - \frac{1}{\sqrt{t}})$.

Exemple 2.25. Pour le nœud de trèfle, on a $\nabla_{3_1}(z) = 1 + z^2$ et $\Delta_{3_1}(t) = t - 1 + \frac{1}{t}$.

Exemple 2.26. Pour le nœud 4_1 , on peut construire l'arbre résolvant suivant :



Grâce à cet arbre on peut calculer :

$$\nabla_{4_1}(z) = 1 - z \cdot (1 \cdot 0 + z \cdot 1) = 1 - z^2.$$

$$\Delta_{4_1}(t) = 1 - (t^{1/2} - t^{-1/2})^2 = -t + 3 - t^{-1}.$$

Proposition 2.27 ([Cro], Theorem 7.3.1). *L'invariant défini à la Définition S 4.36 coïncide avec celui défini à la Définition X 2.23.*

Remarque 2.28. La Définition X a des avantages et inconvénients. Quelques avantages sont :

- Le calcul est purement diagrammatique.
- Il est pratique pour établir des formules de récurrence pour calculer les polynômes d'Alexander de familles infinies d'entrelacs.

Quelques inconvénients sont :

- Le nombre de feuilles de l'arbre résolvant peut-être *exponentiel* en le nombre de croisements du diagramme initial, là où la Définition A utilisait un nombre *polynomial* d'opérations en ce nombre de croisements (calcul de déterminant).
- Il faut bien choisir les croisements à modifier pour avoir un arbre résolvant le plus efficace possible.
- L'invariant n'est pas défini sur les diagrammes, il faut donc parfois savoir reconnaître des entrelacs comme U depuis un diagramme, ce qui peut être difficile.

2.6. Polynôme de Jones et nombre de croisements.

Définition 2.29. Le polynôme de Jones des entrelacs $L \mapsto J_L(t) \in \mathbb{Z}[t^{\pm 1/2}]$ est un polynôme de Laurent en $\sqrt{t}$ défini par les propriétés suivantes :

- J est un invariant d'entrelacs,
- $J_U = 1$,
- Pour tout triplet skein (L_+, L_-, L_0) , on a

$$\frac{1}{t} \cdot J_{L_+}(t) - t \cdot J_{L_-}(t) = \left(\sqrt{t} - \frac{1}{\sqrt{t}} \right) J_{L_0}(t).$$

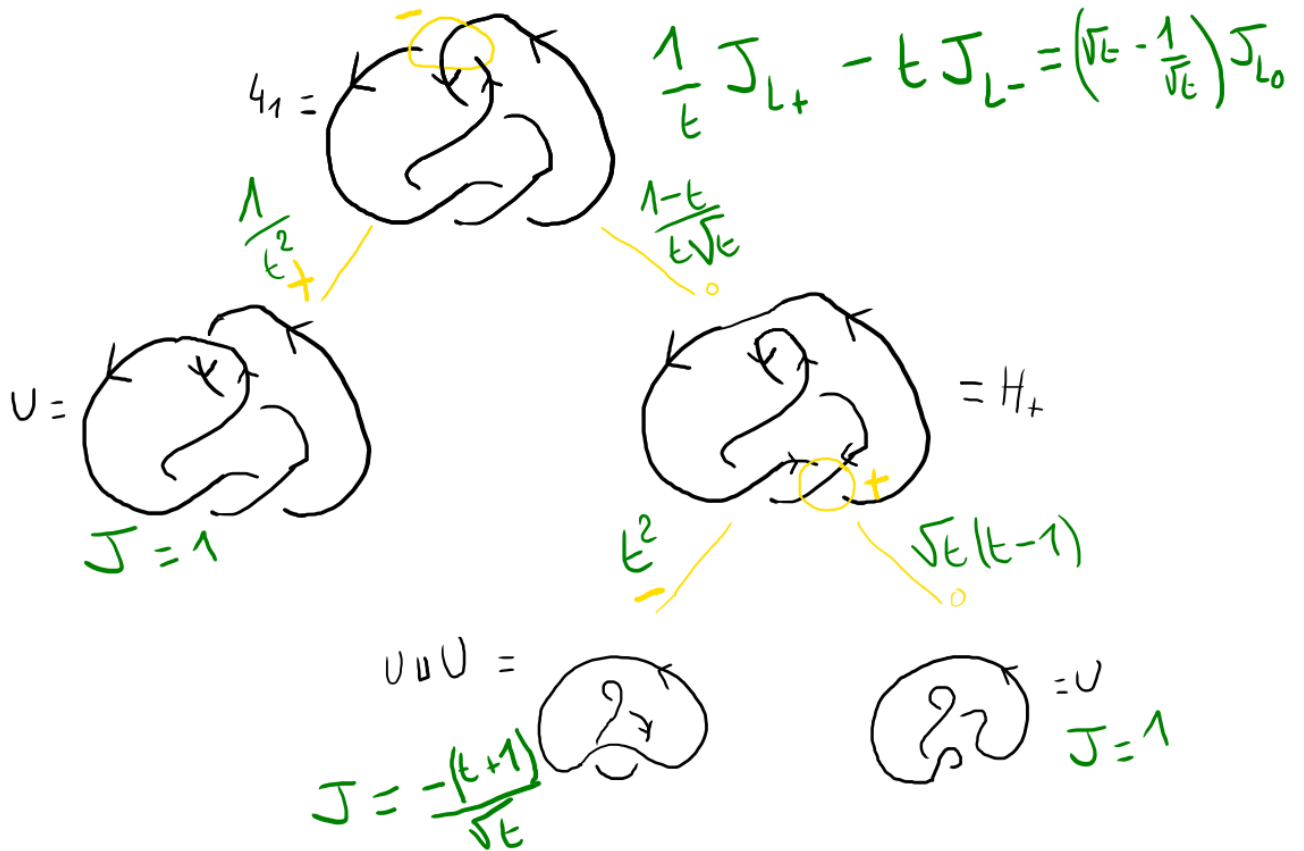
Exemple 2.30. Le polynôme de Jones distingue les nœuds de trèfle gauche et droit :

$$J_{3_1}(t) = t + t^3 - t^4 \neq t^{-1} + t^{-3} - t^{-4} = J_{3_1^*}(t).$$

Proposition 2.31. Soient L, L' deux entrelacs. Alors on a :

- (1) $J_{-L}(t) = J_L(t)$,
- (2) $J_{L^*}(t) = J_L(\frac{1}{t})$,
- (3) $J_{L \# L'}(t) = J_L(t) \cdot J_{L'}(t)$,
- (4) $J_{L \sqcup L'}(t) = J_L(t) \cdot J_{L'}(t) \cdot \frac{-(t+1)}{\sqrt{t}}$.

Exemple 2.32. Pour le nœud 4_1 , on peut construire l'arbre résolvant suivant :



Grâce à cet arbre on peut calculer :

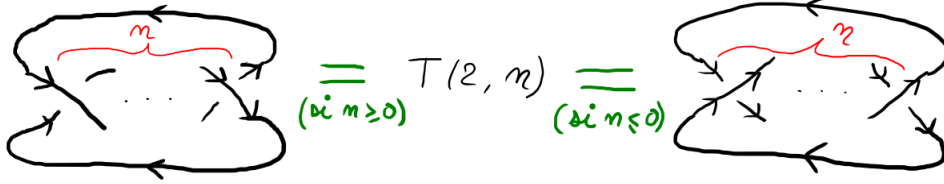
$$J_{4_1}(t) = \frac{1}{t^2} \cdot 1 + \frac{1-t}{t\sqrt{t}} \cdot \left(t^2 \cdot \frac{-(t+1)}{\sqrt{t}} + \sqrt{t}(t-1) \cdot 1 \right) = \frac{1}{t^2} - \frac{1}{t} + 1 - t + t^2.$$

Définition 2.33. La *largeur* $\text{span}(P)$ d'un polynôme P est l'entier positif défini comme la différence des degrés maximal et minimal de ce polynôme.

Proposition 2.34 ([Li] Theorem 5.9, [Cro] Theorem 9.6.2). *Pour tout entrelacs L **non scindé**, on a :*

- (1) *Borne du nombre de croisements : $\text{span}(J_L(t)) \leq c(L)$.*
- (2) *Si L est un entrelacs **alterné**, alors $\text{span}(J_L(t)) = c(L)$.*

Exercice (Les entrelacs toriques $T(2, n)$). *On considère l'entrelacs torique $T(2, n)$.*



- (1) *Identifier $T(2, n)$ pour n entre -5 et 5 .*
- (2) *Montrer que $u(T(2, n)) \leq \frac{|n| - 1}{2}$ pour tout $n \in \mathbb{Z}$ **impair**.*
- (3) *Trouver une relation de récurrence pour $\Delta_{T(2, n)}(t)$, $n \in \mathbb{Z}$.*
- (4) *Trouver une relation de récurrence pour $J_{T(2, n)}(t)$, $n \in \mathbb{Z}$.*
- (5) *Montrer que $\text{span}(J_{T(2, n)}(t)) = n$ pour $n \geq 2$.*
- (6) *Monter que $c(T(2, n)) = n$ pour tout $n \in \mathbb{Z} \setminus \{-1, 1\}$.*

2.7. Le polynôme HOMFLY-PT à 2 variables.

Définition 2.35 (Hoste, Ocneanu, Millett, Freyd, Lickorish, Yetter, Przytycki-Traczyk). Le polynôme HOMFLY $P_L(v, z) \in \mathbb{Z}[v^{\pm 1}, z]$ est défini par :

- P est un invariant d'entrelacs,
- $P_U(v, z) = 1$,
- Pour tout triplet skein (L_+, L_-, L_0) , on a

$$\frac{1}{v} \cdot P_{L_+}(v, z) - v \cdot P_{L_-}(v, z) = z \cdot P_{L_0}(v, z).$$

Proposition 2.36. *Soient L et L' des entrelacs. On a :*

- (1) $P_{-L}(v, z) = P_L(v, z)$,
- (2) $P_{L^*}(v, z) = P_L(v^{-1}, z)$,
- (3) $P_{L \sqcup L'}(v, z) = P_L(v, z) \cdot P_{L'}(v, z) \cdot \frac{v^{-1} - v}{z}$,
- (4) $P_{L \# L'}(v, z) = P_L(v, z) \cdot P_{L'}(v, z)$,
- (5) $\Delta_L(t) = P_L(1, t^{1/2} - t^{-1/2})$,
- (6) $J_L(t) = P_L(t, t^{1/2} - t^{-1/2})$.

2.8. Exercices Séance 2 (6 mars 2026) : Relations skein et Définition X.

Exercice 2.A. : Montrez que

$$u(3_1) = u(4_1) = u(5_2) = u(6_1) = u(S(4_1, W)) = 1,$$

en trouvant un croisement approprié.

Exercice 2.B. : Montrez que

$$u(5_1) = u(3_1 \# 3_1) = u(3_1 \# 3_1^*) = 2.$$

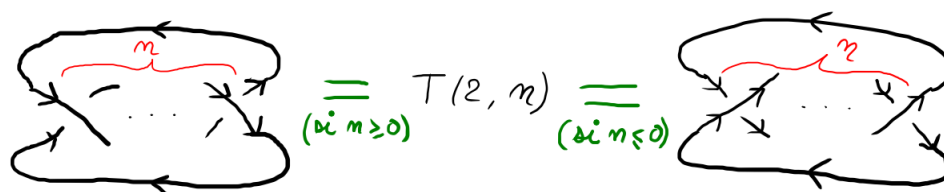
Exercice 2.C. : Montrer que pour tout nœud K , on a $u(K) \leq \frac{1}{2}c(K)$.

Exercice 2.D (Exercice 1.H). En utilisant la Définition A, montrer que le polynôme d'Alexander est multiplicatif pour la somme connexe des nœuds, i.e. pour tous nœuds J et K , on a

$$\Delta_{J \# K}(t) \doteq \Delta_J(t) \cdot \Delta_K(t).$$

On pourra commencer par chercher, dans un diagramme de somme connexe, une paire de régions adjacentes particulièrement appropriée.

Exercice 2.E (Les entrelacs toriques $T(2, n)$). On considère l'entrelacs torique $T(2, n)$.



- (1) Identifier $T(2, n)$ pour n entre -5 et 5 .
- (2) Montrer que $u(T(2, n)) \leq \frac{|n| - 1}{2}$ pour tout $n \in \mathbb{Z}$ **impair**.
- (3) Trouver une relation de récurrence pour $\Delta_{T(2, n)}(t)$, $n \in \mathbb{Z}$.
- (4) Trouver une relation de récurrence pour $J_{T(2, n)}(t)$, $n \in \mathbb{Z}$.
- (5) Montrer que $\text{span}(J_{T(2, n)}(t)) = n$ pour $n \geq 2$.
- (6) Montrer que $c(T(2, n)) = n$ pour tout $n \in \mathbb{Z} \setminus \{-1, 1\}$.

Exercice 2.F (Exercice 1.G). En utilisant la Définition A, pour tous les entiers $q \geq 1$ impairs, calculer le polynôme d'Alexander $\Delta_{T(2, q)}(t)$ du nœud torique $T(2, q)$.

2.9. Solutions des exercices. Exercice 2.A : Montrez que

$$u(3_1) = u(4_1) = u(5_2) = u(6_1) = u(S(4_1, W)) = 1,$$

en trouvant un croisement approprié.

Dans les diagrammes classiques de ces nœuds, n'importe quel croisement fonctionne pour 3_1 et 4_1 , et pour les trois autres il faut choisir un des deux croisements sur la partie supérieure du diagramme.

Exercice 2.B : Montrez que

$$u(5_1) = u(3_1 \# 3_1) = u(3_1 \# 3_1^*) = 2.$$

Dans les diagrammes classiques de ces nœuds, deux croisements quelconques fonctionnent pour 5_1 , et pour les deux autres il faut prendre un croisement dans chaque facteur premier.

Exercice 2.C : Montrer que pour tout nœud K , on a $u(K) \leq \frac{1}{2}c(K)$.

Soit K un nœud.

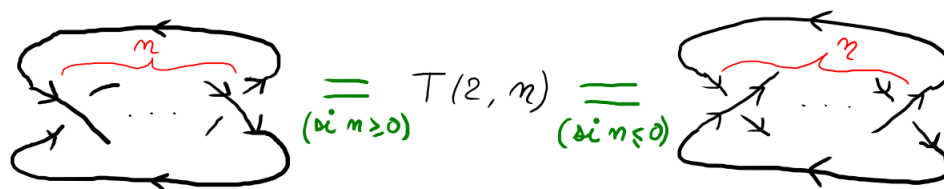
Pour tout diagramme D de K , si on peut passer de D à U en p changements de croisements, alors (par l'effet de l'image miroir sur un diagramme) avec les $c(D) - p$ autres changements on obtiendrait à la place U^* qui est équivalent à U .

Ainsi, pour tout diagramme D de K , on a $u(D) \leq \frac{1}{2}c(D)$.

Donc, pour tout diagramme D de K , par définition de $u(K)$, on a $u(K) \leq u(D) \leq \frac{1}{2}c(D)$.

Par conséquent, en prenant la borne inférieure parmi tous les D sur le terme de droite, et par définition de $c(K)$, on a $u(K) \leq \frac{1}{2}c(K)$.

Exercice 2.E : On considère l'entrelacs torique $T(2, n)$.



- (1) Identifier $T(2, n)$ pour n entre -5 et 5 .
- (2) Montrer que $u(T(2, n)) \leq \frac{|n| - 1}{2}$ pour tout $n \in \mathbb{Z}$ **impair**.
- (3) Trouver une relation de récurrence pour $\Delta_{T(2, n)}(t)$, $n \in \mathbb{Z}$.
- (4) Trouver une relation de récurrence pour $J_{T(2, n)}(t)$, $n \in \mathbb{Z}$.
- (5) Montrer que $\text{span}(J_{T(2, n)}(t)) = n$ pour $n \geq 2$.
- (6) Montrer que $c(T(2, n)) = n$ pour tout $n \in \mathbb{Z} \setminus \{-1, 1\}$.

(Stratégie) Les relations connues entre invariants nous font comprendre que le (5) aidera pour le (6). On peut anticiper que les (3) et (4) utilisent un arbre résolvant.

(1) $T(2, 0) = U \sqcup U$, $T(2, 1) = T(2, -1) = U$, $T(2, 2) = H_+$, $T(2, -2) = H_-$, $T(2, 3) = 3_1$, $T(2, -3) = 3_1^*$, $T(2, 4) = L4a1\{1\}$, $T(2, -4) = L4a1\{1\}^*$, $T(2, 5) = 5_1$ et $T(2, -5) = 5_1^*$.

Pour la suite on prendra $n \in \mathbb{N}$, quitte à passer à l'**image miroir**, car $T(2, -n) = T(2, n)^*$.

(2) Pour $n \in \mathbb{N}$ impair, $\leq$ vient du dessin.

(3) Via un arbre résolvant et la Définition X (forme du polynôme de Conway) :

$$\nabla_{T(2,n)}(z) = z\nabla_{T(2,n-1)}(z) + \nabla_{T(2,n-2)}(z).$$

(4) Via un arbre résolvant : $J_{T(2,n)}(t) = \sqrt{t}(t-1)J_{T(2,n-1)}(t) + t^2J_{T(2,n-2)}(t)$.

(5) On montre par récurrence grâce à (4) que degré minimal = $\frac{n-1}{2}$ et degré maximal = $\frac{3n-1}{2}$.

(6) On a $c(T(2,n)) \geq n$ par le (5).

D'autre part $c(T(2,n)) \leq n$ car $T(2,n)$ a un diagramme à n croisements.

Ou directement, on peut dire que $c(T(2,n)) = n$ car $T(2,n)$ est **alterné** et par le (5).

3. GRILLES ET DÉFINITION M

La quasi-intégralité de ce chapitre est tirée du Mémoire de M2 "Une définition du polynôme d'Alexander par les diagrammes en grille pour les entrelacs" [La] effectué par Louis Lascaud en 2025 sous la direction de Fathi Ben Aribi à Sorbonne-Université et à l'Université Paris-Cité.

Ce mémoire s'appuie lui-même sur le livre [OSS15].

3.1. Diagrammes en grille.

Définition 3.1. Un *diagramme en grille* $\mathbb{G}$ de taille $n \in \mathbb{N}^*$ est la donnée de :

- une grille $n \times n$,
- une distribution de n copies de la lettre O sur la grille, une par ligne et une par colonne, ce qui équivaut à la donnée d'une permutation σ_O (les O apparaissent aux emplacements des coefficients 1 d'une matrice de permutation de taille n),
- une distribution de n copies de la lettre X sur la grille, une par ligne et une par colonne, ce qui équivaut à la donnée d'une permutation σ_X (les X apparaissent aux emplacements des coefficients 1 d'une matrice de permutation de taille n), **de sorte que les X et les O soient dans des cases distinctes.**

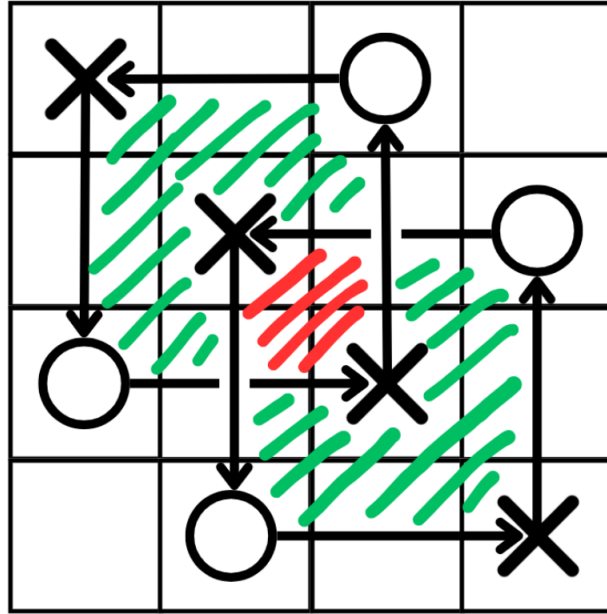


FIGURE 29. Diagramme en grille pour l'entrelacs de Hopf positif, la région verte est d'indice 1 et la rouge d'indice 2

Attention, on utilise les conventions suivantes pour la notation des permutations :

- les colonnes sont numérotées de gauche à droite,
- les lignes sont numérotées **de bas en haut**,
- on place un O (resp X) à chaque case ainsi numérotée $(i, \sigma_O(i))$ (resp. $(i, \sigma_X(i))$).

Ainsi, dans l'exemple de la Figure 29, on a $\sigma_O = (1, 2)(3, 4)$ et $\sigma_X = (1, 4)(2, 3)$.

Définition 3.2. Soit $\mathbb{G}$ un diagramme en grille. Le *diagramme d'entrelacs associé* $D(\mathbb{G})$ est le diagramme d'entrelacs obtenu en traçant les traits suivants :

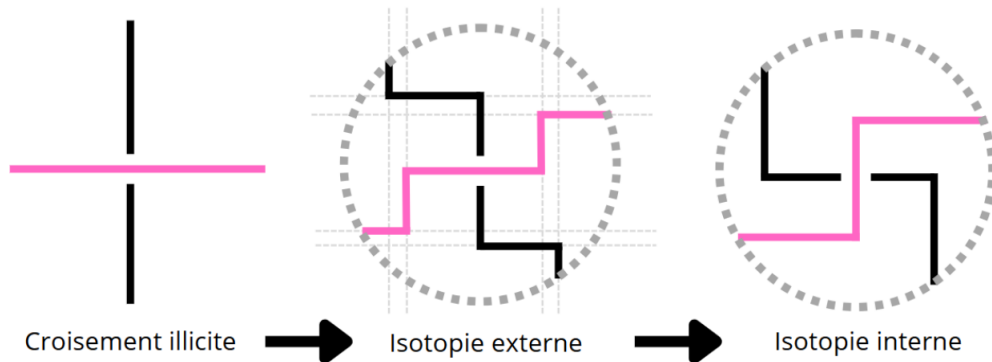
- sur chaque colonne, un trait vertical allant de X à O ,
- sur chaque ligne, un trait horizontal allant de O à X ,

— à chaque croisement, le brin vertical passe au-dessus du brin horizontal.

Ainsi, dans l'exemple de la Figure 29, $D(\mathbb{G})$ est un diagramme de l'entrelacs de Hopf positif.

Proposition 3.3. *À tout entrelacs L on peut associer un diagramme en grille $\mathbb{G}$ de sorte que $D(\mathbb{G})$ soit un diagramme de L .*

Démonstration. Étant donné L , on commence par construire un diagramme D de L , puis on modifie celui-ci avec des isotopies planaires pour obtenir un diagramme qui est de la forme $D(\mathbb{G})$ excepté du point de vue des croisements. Ensuite on effectue les isotopies suivantes, quitte à augmenter la taille de la grille.

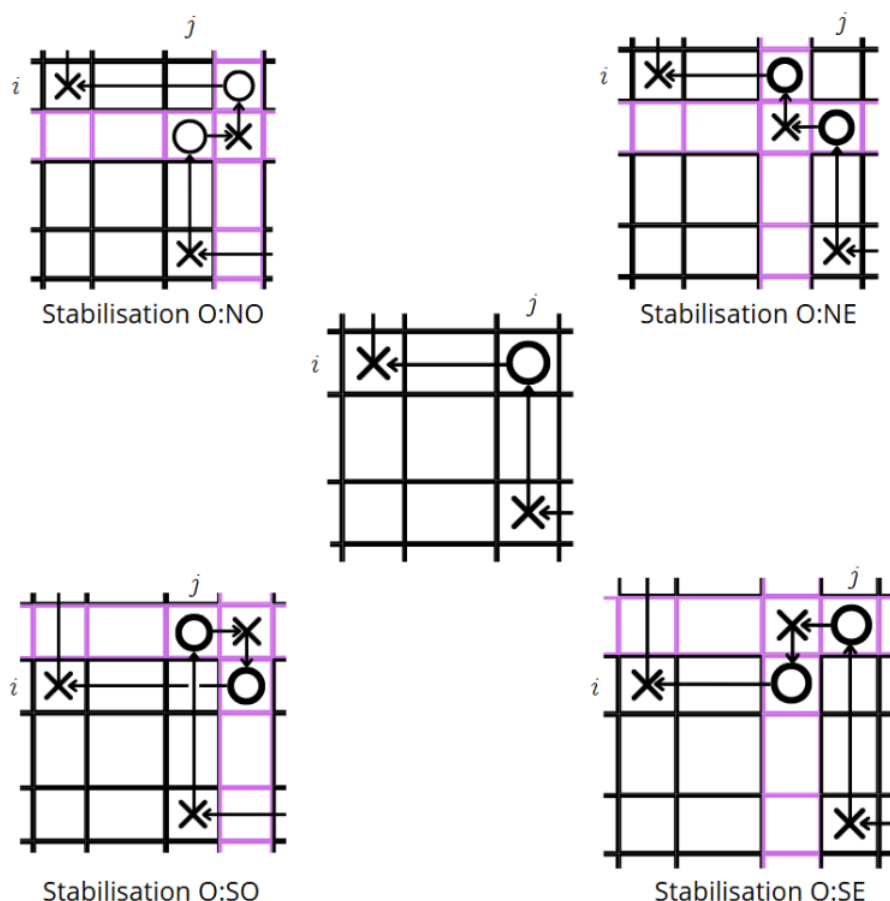


(l'image de droite est malheureusement assez malvenue, j'en conviens...)

□

Théorème 3.4 (Cromwell). *Deux diagrammes en grille représentent des entrelacs équivalents si et seulement si l'on peut passer de l'un à l'autre par une suite finie de mouvements de grille, i.e. : commutation de lignes, commutation de colonnes, stabilisation ou déstabilisation.*

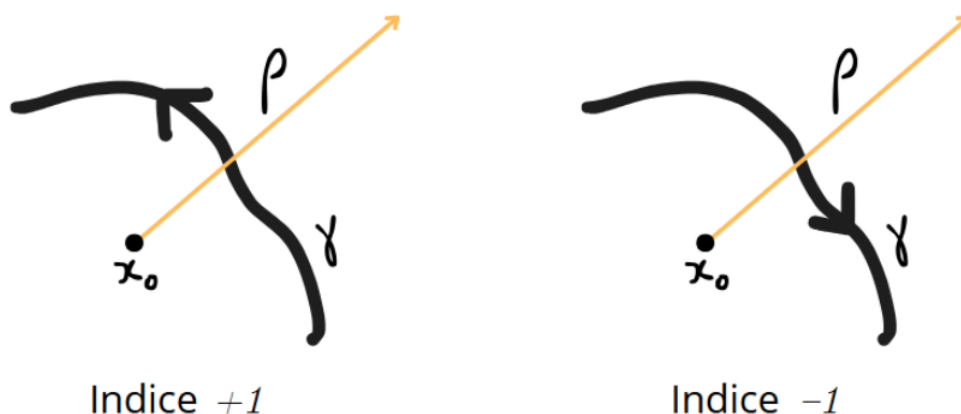
Ici, une *stabilisation* fait référence à un mouvement tel que dans la figure suivante, de la configuration centrale à une des quatre coins. La **déstabilisation** représente le mouvement inverse.



3.2. Indices de régions. En séance 3 du cours on a vu la plupart du contenu de la section "Régions et colonnes" dans le Chapitre 1, ci-dessus.

On a également abordé un autre point de vue sur l'indice $i(R)$ d'une région R , que nous décrivons maintenant.

Étant donné un diagramme en grille $D(\mathbb{G})$ d'un entrelacs L (mais cela serait vrai aussi pour un diagramme d'entrelacs D quelconque), on définit $i(R)$ comme le **nombre d'intersection algébrique** de la demi-droite ρ commençant en $x_0 \in R$ et d'angle quelconque, avec le diagramme $D(\mathbb{G})$ (en additionnant les nombres d'intersections correspondant à chaque courbe γ rencontrée). On admet que c'est bien défini, indépendant de l'angle et du point $x_0 \in R$ choisi, et équivalent à la définition vue au Chapitre 1. La figure ci-après résume les conventions de signe pour le nombre d'intersection (on compte l'orientation du mouvement allant du vecteur de la demi-droite ρ au vecteur tangent à la courbe γ du diagramme d'entrelacs)



3.3. Matrice du démineur et Définition M. On va associer plusieurs éléments à un diagramme en grille, pour finalement les combiner en la Définition M du polynôme d'Alexander.

Définition 3.5. Le *facteur de normalisation* $a(\mathbb{G})$ est défini comme $\frac{1}{8}$ fois la somme des indices de régions aux quatre coins de chaque case contenant un O ou un X .

Définition 3.6. Le *facteur de signe* $s(\mathbb{G})$ est défini comme

$$s(\mathbb{G}) := (-1)^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} \epsilon(\sigma_{\mathbb{O}}).$$

Définition 3.7. La *matrice du démineur* $M(\mathbb{G})(t) \in M_{n,n}(\mathbb{Z}[t^{\pm 1}])$ est obtenue ainsi : on prend le carré $(n+1) \times (n+1)$ fait par les sommets de la grille, puis en enlevant la plus haute ligne de sommets et la colonne de sommets la plus à droite, puis à chaque sommet on place le coefficient t^{-I} où I est l'indice de la région à ce sommet. Cela donne la matrice $M(\mathbb{G})(t)$.

Définition 3.8. (Définition M) Soit L un entrelacs et $\mathbb{G}$ un diagramme en grille associé de taille n . Alors le polynôme

$$\Delta_L(t) := s(\mathbb{G}) \cdot \det(M(\mathbb{G})(t)) \cdot t^{a(\mathbb{G})} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{t}} - \sqrt{t} \right)^{1-n}$$

- (1) est un invariant de L (i.e. est invariant par mouvement de grilles),
- (2) est égal au polynôme d'Alexander normalisé de la Définition X (i.e. vérifie la relation skein).

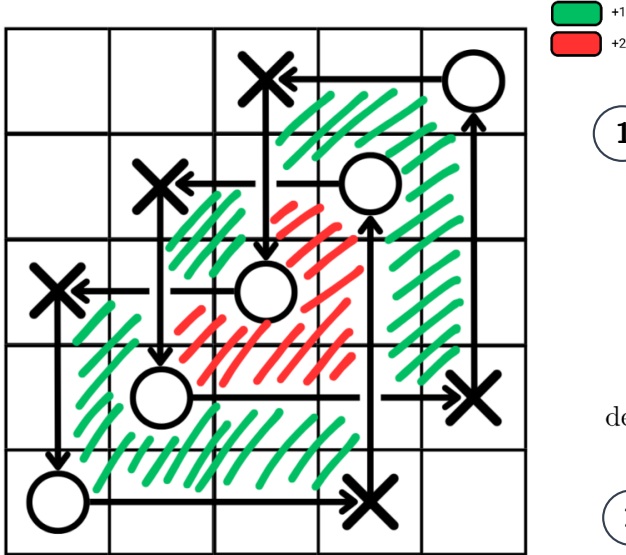
On admettra la preuve de cet énoncé.

Comme exemple, avec la grille de la Figure 29, on trouve la valeur suivante pour la Définition M (où $k := 1 - n$ ici), ce qui correspond bien à la valeur qu'on connaissait pour l'entrelacs de Hopf positif.

Nombre de $\mathbb{G}$	$n = 4$
	$k = -3$
	$\sigma_{\mathbb{O}} = (1, 2)(3, 4)$
	$\varepsilon(\sigma_{\mathbb{O}}) = 1$
Facteur de signe	$s(\mathbb{G}) = 1$
Matrice du démineur	$\mathbf{M}(\mathbb{G}) = \begin{pmatrix} 1 & t^{-1} & t^{-1} & 1 \\ 1 & t^{-1} & t^{-2} & t^{-1} \\ 1 & 1 & t^{-1} & t^{-1} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ $\det(\mathbf{M}(\mathbb{G})) = -t^{-4}(t-1)^4$
	$\Sigma = 8a(\mathbb{G}) = 16$
Facteur de normalisation	$a(\mathbb{G}) = 2$
Polynôme d'Alexander	$\Delta_{\mathbb{G}}(t) = t^{\frac{1}{2}} - t^{-\frac{1}{2}}$

Ci-après un autre exemple fait en détail avec le nœud de trèfle gauche.

Calcul de $\Delta_{3_1^*}$ (nœud de trèfle gauche)



1 Matrice du démineur

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & t^{-1} & t^{-1} \\ 1 & 1 & t^{-1} & t^{-2} & t^{-1} \\ 1 & t^{-1} & t^{-2} & t^{-2} & t^{-1} \\ 1 & t^{-1} & t^{-1} & t^{-1} & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

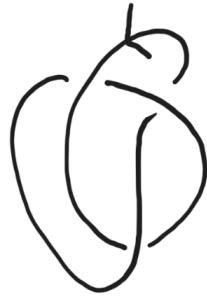
$$\det(\mathbf{M}(\mathbb{G})) = t^{-4}(t-1)^4(t^{-2} - t^{-1} + 1)$$

2 Facteur de normalisation

$$\begin{aligned} 8a(\mathbb{G}) &= 0 + 0 + 1 + 0 \\ &+ 0 + 0 + 0 + 1 \\ &+ 0 + 0 + 1 + 0 \\ &+ 1 + 1 + 1 + 2 \\ &+ 0 + 0 + 1 + 0 \\ &+ 1 + 2 + 2 + 2 \\ &+ 1 + 2 + 1 + 1 \\ &+ 1 + 0 + 0 + 0 \\ &+ 0 + 1 + 0 + 0 \\ &+ 1 + 0 + 0 + 0 \end{aligned}$$

$$8a(\mathbb{G}) = 24$$

$$a(\mathbb{G}) = 3$$



Diagrammes de 3_1^*

$$\Delta_{3_1^*}(t) = t - 1 + t^{-1}$$

3 Facteur de signe

$$\sigma_{\mathbb{O}} = id_{\llbracket 0,5 \rrbracket}$$

$$\varepsilon(\sigma_{\mathbb{O}}) = 1$$

$$s(\mathbb{G}) = (-1)^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} \varepsilon(\sigma_{\mathbb{O}})$$

$$n = 5$$

$$s(\mathbb{G}) = +1$$

$$\Delta_{\mathbb{G}}(t) = s(\mathbb{G}) t^{a(\mathbb{G})} \det(\mathbf{M}(\mathbb{G})(t)) (t^{-\frac{1}{2}} - t^{\frac{1}{2}})^{1-n}$$

$$= t - 1 + t^{-1} = \Delta_{3_1^*}(t)$$

3.4. Homologie en grille et catégorification (pas au programme de l'examen).

Cette section est tirée de [OSS15].

L'homologie en grille (*simply blocked grid homology*) sur le corps $\mathbb{F}$ d'un nœud K est un espace vectoriel bigradué noté $\widehat{GH}(K)$ (initialement noté $\widehat{GH}(\mathbb{G})$ d'un diagramme en grille $\mathbb{G}$ de K , mais c'est invariant par mouvements de grille), indexé par $d, s \in \mathbb{Z}$:

$$\widehat{GH}(K) = \bigoplus_{d,s \in \mathbb{Z}} \widehat{GH}(K)_{d,s}$$

où chaque $\widehat{GH}(K)_{d,s}$ est un $\mathbb{F}$ -espace vectoriel, et ils sont tous nuls sauf un nombre fini.

C'est un invariant de nœud.

Cette homologie est une version combinatoire des homologies de Floer ou Heegaard-Floer, initialement définies avec des outils géométriques comme les disques holomorphes.

Définition 3.9. Si $X = \bigoplus_{d,s \in \mathbb{Z}} X_{d,s}$ est un espace vectoriel bigradué, sa *caractéristique d'Euler graduée* est

$$\chi(X) := \sum_{d,s \in \mathbb{Z}} (-1)^d \dim(X_{d,s}) t^s \in \mathbb{Z}[t^{\pm 1}].$$

Théorème 3.10 (Ozsvath-Szabo 2003, Rasmussen 2004). *Pour tout nœud K , on a*

$$\chi(\widehat{GH}(K)) = \Delta_K(t),$$

i.e. la caractéristique d'Euler graduée de l'homologie en grille est le polynôme d'Alexander symétrisé de la Définition M.

On dit ainsi que l'homologie en grille est une *catégorification* du polynôme d'Alexander. En autre exemple, l'homologie de Khovanov est une catégorification du polynôme de Jones.

Exemple 3.11. Pour $K = U$ le nœud trivial, on a

$$\widehat{GH}(U)_{0,0} = \mathbb{F}, \quad \widehat{GH}(U)_{d,s} = 0 \text{ sinon.}$$

On trouve alors

$$\chi(\widehat{GH}(U)) = (-1)^0 \cdot 1 \cdot t^0 = 1 = \Delta_U(t).$$

Exemple 3.12. Pour $K = 3_1 = T(2, 3)$ le nœud de trèfle droit, on a

$$\widehat{GH}(3_1)_{d,s} = \mathbb{F} \text{ si } (d, s) \in \{(0, 1), (-1, 0), (-2, -1)\}, \quad \widehat{GH}(3_1)_{d,s} = 0 \text{ sinon.}$$

On trouve alors

$$\chi(\widehat{GH}(3_1)) = (-1)^0 \cdot 1 \cdot t^1 + (-1)^{-1} \cdot 1 \cdot t^0 + (-1)^{-2} \cdot 1 \cdot t^{-1} = t - 1 + t^{-1} = \Delta_{3_1}(t).$$

Proposition 3.13. *Pour tout nœud K d'image miroir K^* , on a pour tous $d, s \in \mathbb{Z}$:*

$$\widehat{GH}(K)_{d,s} = \widehat{GH}(K^*)_{2s-d,s}.$$

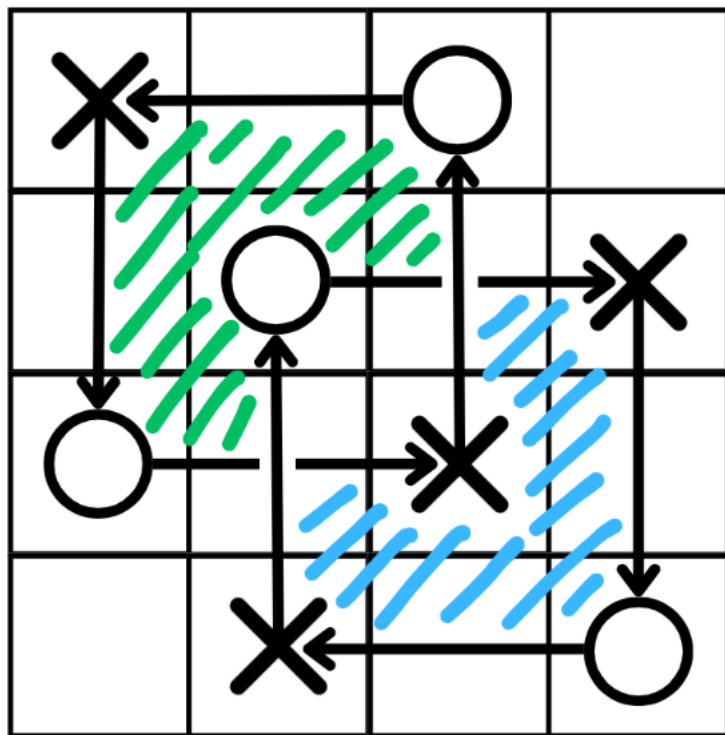
En particulier, on en déduit que les nœuds de trèfle gauche et droit n'ont pas les mêmes homologies en grille, alors qu'ils ont le même polynôme d'Alexander symétrisé !

L'homologie en grille détecte en effet bien plus d'information que le polynôme d'Alexander, comme par exemple :

- elle distingue le nœud trivial des autres nœuds.
- elle détecte le *genre* $g(K)$ (voir Chapitre 4).
- elle détecte le caractère *fibré* ou non du nœud, ce qui veut dire que l'extérieur du nœud est ou non un fibré en surfaces percées au-dessus du cercle.

3.5. Exercices Séance 3 (11 mars 2026) : Grilles et Définition M.

Exercice 3.A. On considère le diagramme en grille suivant de l'entrelacs de Hopf négatif H^- .



- (1) Déterminer les permutations $\sigma_{\mathbb{O}}$ et $\sigma_{\mathbb{X}}$ associées à ce diagramme en grille.
- (2) Vérifier que les indices des trois régions internes sont $-1, 0, 1$.
- (3) En utilisant la Définition M, montrer que le polynôme d'Alexander symétrisé est $\Delta_{H^-}(t) = \frac{1}{\sqrt{t}} - \sqrt{t}$.

Exercice 3.B. Pour $n = 6$, $\sigma_{\mathbb{O}} = (1, 4)(2, 5)(3, 6)$ et $\sigma_{\mathbb{X}} = (1, 3)(4, 6)$, dessiner le diagramme en grille $\mathbb{G}$ associé, identifier l'entrelacs L correspondant et calculer son polynôme d'Alexander symétrisé $\Delta_L(t)$.

Exercice 3.C. Pour $n = 8$, $\sigma_{\mathbb{O}} = (2, 5, 3, 4, 6, 7)$ et $\sigma_{\mathbb{X}} = (1, 7, 6, 5)(2, 3, 8, 4)$,

- (1) Dessiner le diagramme en grille $\mathbb{G}$ associé et l'entrelacs L correspondant.
- (2) Vérifier que L à trois composantes L_1, L_2, L_3 , et montrer que tout sous-entrelacs de L à deux composantes $L_1 \cup L_2$, $L_1 \cup L_3$ ou $L_2 \cup L_3$ est l'entrelacs trivial à deux composantes. On dit que L est brunnien.
- (3) Montrer que $s(\mathbb{G}) = -1$, $a(\mathbb{G}) = \frac{7}{2}$ et que son polynôme d'Alexander symétrisé est $\Delta_L(t) = \left(\sqrt{t} - \frac{1}{\sqrt{t}}\right)^4$.

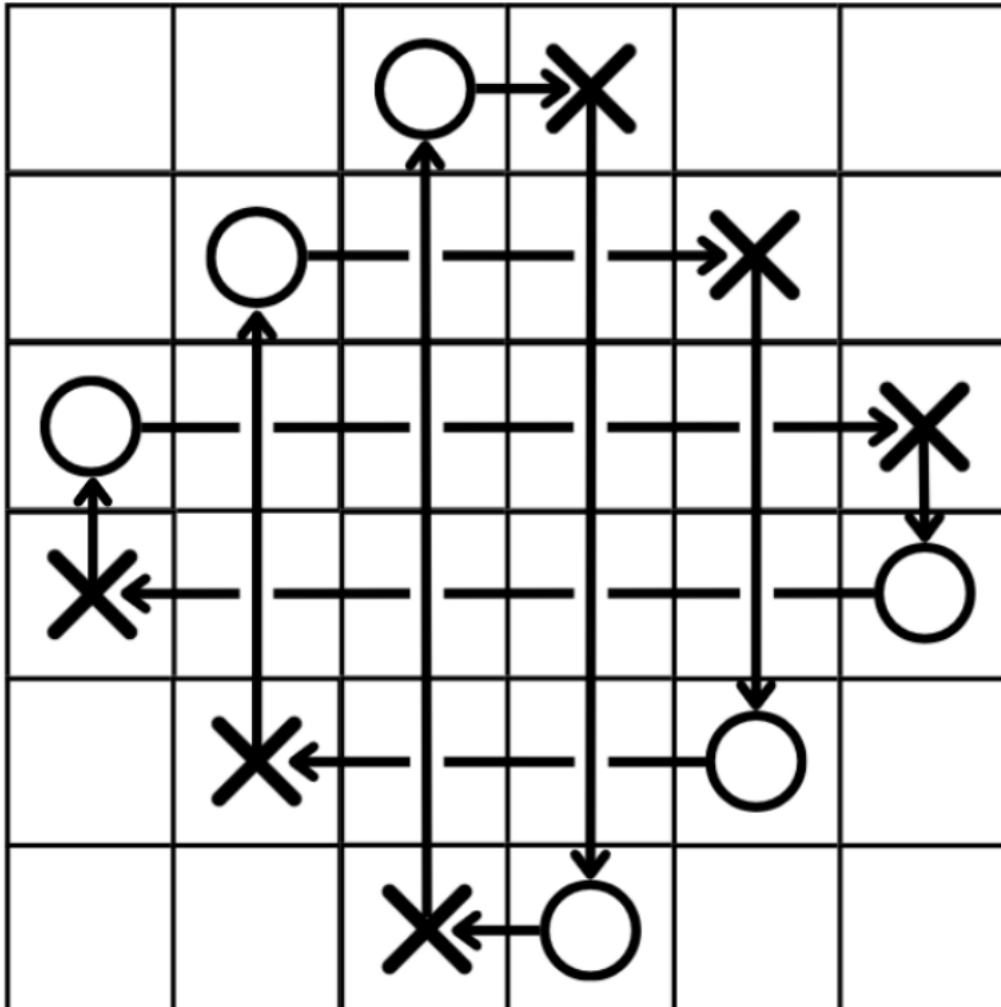
3.6. Corrections des exercices.

Exercice 3.A

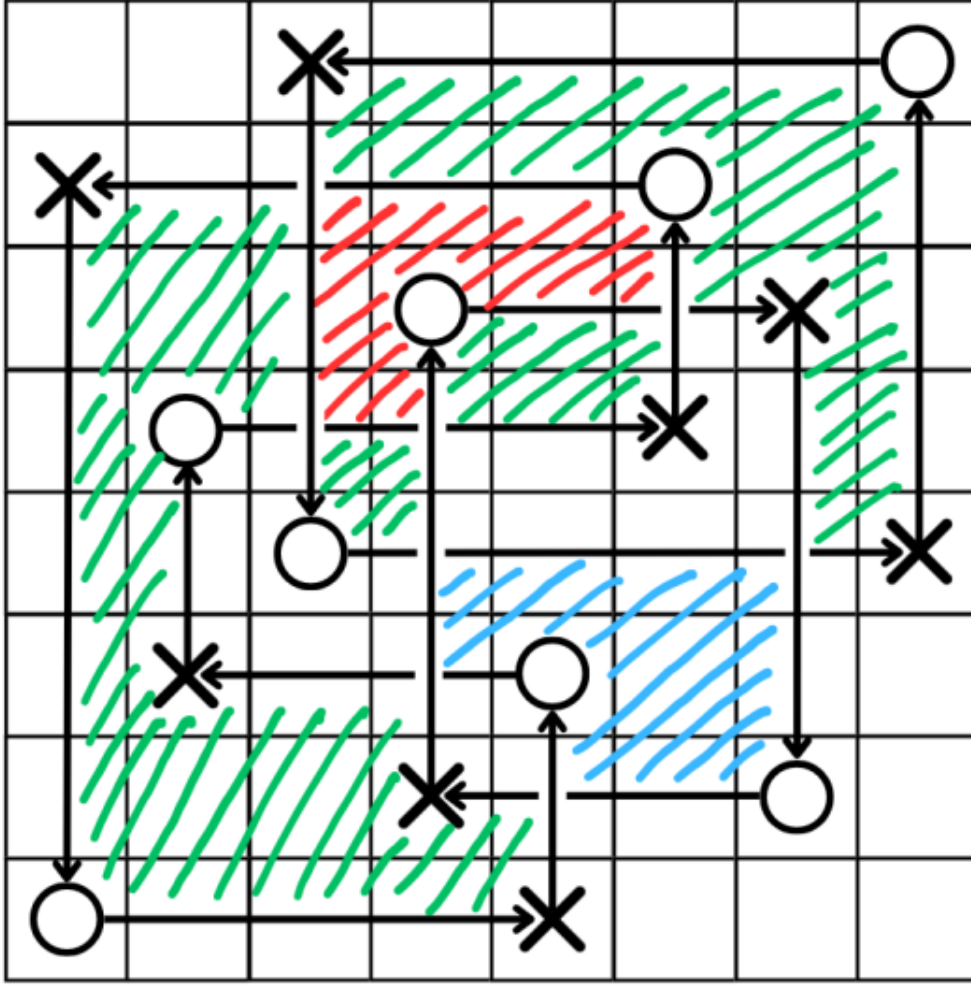
Les permutations sont $\sigma_{\mathbb{O}} = (1, 2, 3, 4)$ et $\sigma_{\mathbb{X}} = (1, 4, 3, 2)$. Dans ce qui suit $k := 1 - n$.

Nombre de $\mathbb{G}$	$n = 4$
	$k = -3$
	$\sigma_{\mathbb{O}} = (1, 2, 3, 4)$
	$\varepsilon(\sigma_{\mathbb{O}}) = -1$
Facteur de signe	$s(\mathbb{G}) = 1$
Matrice du démineur	$\mathbf{M}(\mathbb{G}) = \begin{pmatrix} 1 & t^{-1} & t^{-1} & 1 \\ 1 & t^{-1} & 1 & t \\ 1 & 1 & t & t \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ $\det(\mathbf{M}(\mathbb{G})) = -t^{-2}(t-1)^4$
	$\Sigma = 8a(\mathbb{G}) = 0$
Facteur de normalisation	$a(\mathbb{G}) = 0$
Polynôme d'Alexander	$\Delta_{\mathbb{G}}(t) = t^{-\frac{1}{2}} - t^{\frac{1}{2}}$

Exercice 3.B On voit que l'entrelacs L est l'entrelacs trivial à trois composantes, il est donc scindé, donc $\Delta_L(t) = 0$ (sans avoir besoin de la Définition M).



Exercice 3.C Dans ce qui suit $k := 1 - n$.



Nombre de $\mathbb{G}$	$n = 8$
	$k = -7$
	$\sigma_{\mathbb{O}} = (2, 5, 3, 4, 6, 7)$
	$\varepsilon(\sigma_{\mathbb{O}}) = -1$
Facteur de signe	$s(\mathbb{G}) = -1$
Matrice du démineur	$\mathbf{M}(\mathbb{G}) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & u & u & u & u & u \\ 1 & u & u & u^2 & u^2 & u^2 & u & u \\ 1 & u & u & u^2 & u & u & 1 & u \\ 1 & u & 1 & u & 1 & 1 & 1 & u \\ 1 & u & 1 & 1 & u^{-1} & u^{-1} & u^{-1} & 1 \\ 1 & u & u & u & 1 & u^{-1} & u^{-1} & 1 \\ 1 & u & u & u & u & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{où } u = t^{-1}$ $\det(\mathbf{M}(\mathbb{G})) = t^{-9}(t - 1)^{11}$
	$\Sigma = 8a(\mathbb{G}) = 28$
Facteur de normalisation	$a(\mathbb{G}) = \frac{7}{2}$
Polynôme d'Alexander	$\Delta_{\mathbb{G}}(t) = t^{-2}(t - 1)^4 = (t^{\frac{1}{2}} - t^{-\frac{1}{2}})^4$

4. SURFACES DE SEIFERT ET DÉFINITION S

4.1. **Nombre d'enlacement** (vu en séance 4, voir section 1.3bis ci-dessus). Voir Exercices 4.A et 4.B.

Préliminaires sur les CW-complexes.

Définition 4.1. Un *CW-complexe fini* X est un CW-complexe de dimension d pour un certain entier positif d , où ce dernier terme est défini par récurrence ainsi :

- Un *CW-complexe de dimension 0* X_0 est une union finie de r_0 points (les *0-cellules*), muni de la topologie discrète.
- Un *CW-complexe de dimension d* X_d est obtenu à partir d'un CW-complexe X_{d-1} de dimension $d-1$ comme quotient de l'union disjointe de X_{d-1} avec un nombre fini r_d de boules fermées $\mathbb{B}^d$ (les *d -cellules*) :

$$X_d = (X_{d-1} \sqcup \mathbb{B}_1^d \sqcup \dots \sqcup \mathbb{B}_{r_d}^d) / \sim$$

où l'image de chaque sphère de bord $\mathbb{S}_j^{d-1}$ par l'application quotient est une union de cellules de X_{d-1} , et la topologie sur X_d est la topologie quotient.

L'union des j -cellules de X pour $0 \leq j \leq k$ est appelée le *k -squelette* de X .

On dit qu'un espace topologique Y admet une *décomposition en CW-complexe* (ou une *structure de CW-complexe*) s'il existe un CW-complexe fini X tel que Y est homéomorphe à X .

Remarquons qu'un CW-complexe fini est compact par construction.

On peut étendre la définition au cas d'un nombre infini de cellules ou sans borner la dimension, mais ce ne sera pas utile dans l'immédiat.

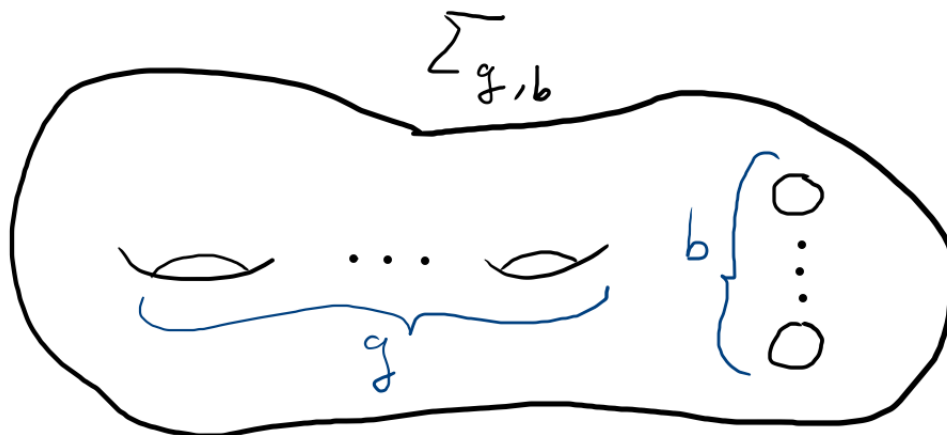
Exemple 4.2. — La sphère $\mathbb{S}^n$ admet une décomposition en CW-complexe avec une 0-cellule et une n -cellule, où le bord $\mathbb{S}^{n-1}$ de la n -cellule est recollé au point via l'application constante.

- Les CW-complexes finis de dimension 1 sont exactement les graphes.

Proposition 4.3. Soit X un CW-complexe fini, de dimension d . Alors sa caractéristique d'Euler-Poincaré est une somme alternée des nombres r_j de ses cellules de chaque dimension j :

$$\chi(X) = r_0 - r_1 + r_2 - \dots + (-1)^d r_d.$$

Préliminaires sur les surfaces (orientables). On rappelle un résultat fondamental de la classification des surfaces : toute surface compacte connexe orientable est difféomorphe à la surface type $\Sigma_{g,b}$ à de genre $g \geq 0$ (à g anses) et à b composantes de bord (ou *trous*).



Une description topologique de $\Sigma_{g,b}$ est un $4g$ -gone d'arêtes orientées $a_1, \dots, a_{4g}$, recollé à lui-même en identifiant a_{4k+1} à $-a_{4k+3}$ et a_{4k+2} avec a_{4k+4} (pour $0 \leq k \leq g-1$), et dont on a retiré b petits disques à l'intérieur.

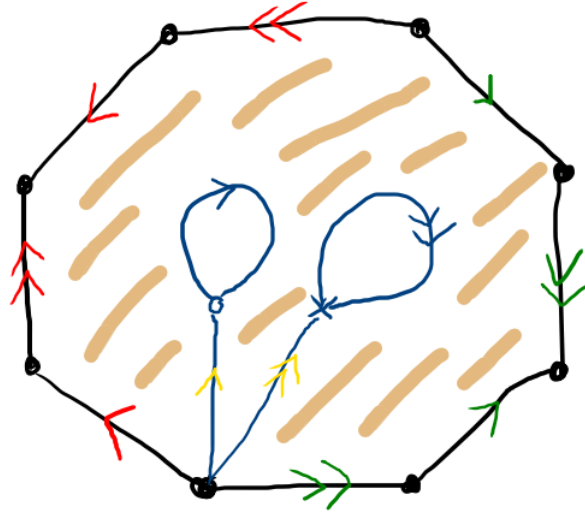


FIGURE 30. Une décomposition en CW-complexe de la surface $\Sigma_{2,2}$

La Figure 30 décrit le cas $g = 2, b = 2$: la décomposition en CW-complexe compte 3 points (le noir, le cercle bleu, la croix bleue), 8 arêtes (à flèche simple ou double, de couleur bleue, rouge, jaune ou verte) et une 2-cellule (homéomorphe au disque ouvert) en hachures brunes.

Exemple 4.4. — $\Sigma_{0,0}$ est la sphère $\mathbb{S}^2$.

- $\Sigma_{0,1}$ est le disque $\mathbb{B}^2$.
- $\Sigma_{0,2}$ est $\mathbb{S}^1 \times [0, 1]$, qu'on peut voir comme un anneau ou un cylindre.
- $\Sigma_{0,3}$ est le disque à deux trous, aussi appelé *pantalon*.
- $\Sigma_{1,0}$ est le tore $\mathbb{S}^1 \times \mathbb{S}^1$.
- $\Sigma_{1,1}$ est le tore troué, qui se rétracte sur un bouquet de deux cercles.
- $\Sigma_{2,0}$ est la surface de genre 2.

Proposition 4.5. *La caractéristique d'Euler d'une surface vérifie*

$$\chi(\Sigma_{g,b}) = 2 - 2g - b.$$

Définition 4.6. Soient M, N deux variétés orientées de même dimension d .

La somme connexe $M \sharp N$ est la variété orientée de dimension d obtenue en retirant une petite boule de dimension d à M et à N et en recollant ces deux nouvelles variétés le long du bord $\mathbb{S}^{d-1}$ via un homéomorphisme de $\mathbb{S}^{d-1}$ inversant l'orientation.

Exemple 4.7. En dimension 2, la somme connexe de deux tores est une surface de genre 2.

Exemple 4.8. La somme connexe des nœuds (Définition 2.4) s'inscrit dans le cadre de la Définition 4.6, mais en conservant le caractère *plongé dans $\mathbb{S}^3$* des 1-variétés en question.

Préliminaires sur l'orientation. Sans faire un rappel général sur ce qu'est l'orientation des variétés différentiables, précisons ce qu'il se passe pour les objets qui nous intéressent, donc en dimensions inférieures à 3 :

- $\mathbb{S}^3$ admet deux orientations possibles : la règle de la main droite (convention classique pour un repère orthonormé de $\mathbb{R}^3$) ou celle de la main gauche. Quand on voudra préciser, on notera $(\mathbb{S}^3, droite)$ ou $(\mathbb{S}^3, gauche)$ plutôt que $\mathbb{S}^3$. A priori on prendra toujours l'orientation main droite pour $\mathbb{S}^3, \mathbb{R}^3$ et $\mathbb{B}^3$.
- L'orientation d'un entrelacs L plongé dans $\mathbb{S}^3$ est donné par le sens de parcours de chacune de ses composantes
- Pour une surface connexe S plongée dans $\mathbb{R}^3$, l'orientation de S sera notée sur S par un symbole de sens de rotation $\circlearrowright$ ou $\circlearrowleft$, selon comment on ordonne une base de deux vecteurs tangents en un point. On colorera en jaune une surface orientée $\circlearrowright$ et en bleu sinon.
- Si la surface connexe S à un bord L , alors l'orientation de S induit celles des composantes de L , de manière cohérente avec le symbole de sens de rotation. Ainsi, les deux bords parallèles d'une fine partie en bande de S auront des sens de parcours opposés.
- Pour une surface connexe S plongée dans $\mathbb{R}^3$, le choix du vecteur normal sortant en un point $x \in S$ dépend des orientations de S et de $\mathbb{R}^3$. Ainsi, pour l'orientation main droite sur $\mathbb{R}^3$ et l'orientation $\circlearrowright$ sur le plan de cette page, le vecteur normal sortant ira de la page à votre œil.

Remarque 4.9. Soit K un nœud (orienté) dans $(\mathbb{R}^3, droite)$, $\sigma: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ une réflexion de $(\mathbb{R}^3, droite)$ (qui inverse donc l'orientation), et $K^* := \sigma(K)$ l'image miroir de K .

Notons $\iota: (\mathbb{R}^3, gauche) \rightarrow (\mathbb{R}^3, droite)$ l'application qui est l'identité de $\mathbb{R}^3$ d'un point de vue ensembliste, mais qui change le choix d'orientation.

Alors il existe un difféomorphisme *positif* (i.e. respectant l'orientation) entre $(\mathbb{R}^3, gauche, K)$ et $(\mathbb{R}^3, droite, K^*)$, à savoir $\sigma \circ \iota$.

De ce point de vue, pour passer d'un nœud à son image miroir, il est donc équivalent

- de remplacer le nœud par son image par une réflexion et de laisser la même orientation à l'espace ambiant,
- d'inverser l'orientation de l'espace ambiant en laissant le positionnement du nœud inchangé.

4.2. Surface de Seifert et genre d'un entrelacs.

Définition 4.10. Soit L un entrelacs de $\mathbb{S}^3$.

Une *surface de Seifert de L* est une surface S plongée dans $\mathbb{S}^3$, connexe compacte orientée de bord l'entrelacs L .

Le *genre de L* $g(L) \in \mathbb{N}$ est le genre minimum possible d'une surface de Seifert de L .

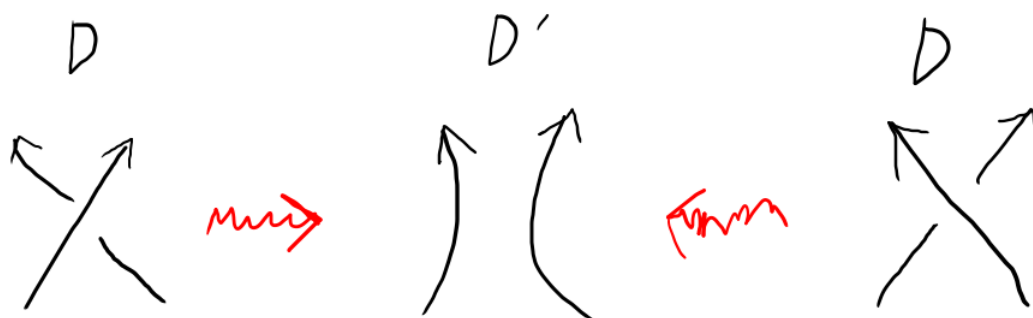
Exemple 4.11. Le nœud trivial U borde un disque, donc $g(U) = 0$.

Proposition 4.12. *Tout entrelacs admet au moins une surface de Seifert. En particulier, le genre d'un entrelacs est un entier bien défini.*

Démonstration. On va suivre l'*algorithme de Seifert* pour construire une surface de Seifert S d'un entrelacs L donné.

Soit D un diagramme connexe de L (on peut toujours le supposer quitte à utiliser des mouvements de Reidemeister $R2$), et c son nombre de croisements.

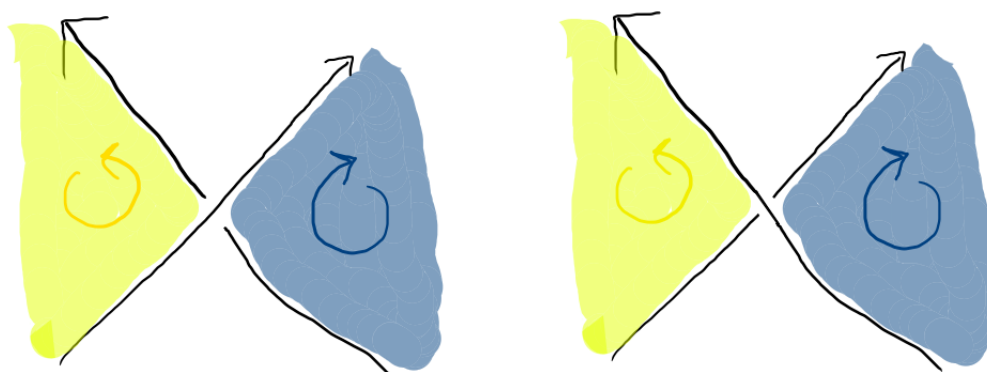
Appelons D' le diagramme obtenu depuis D en remplaçant un voisinage de chaque croisement par deux brins parallèles allant dans la même direction, comme dans la figure suivante.



Le diagramme D' est alors composé d'un nombre fini s de cercles orientés dits *cercles de Seifert*, certains pouvant être imbriqués dans d'autres.

Construisons alors la surface S' plongée dans $\mathbb{R}^3$ comme union disjointe de s disques, chaque disque ayant pour bord un des cercles de Seifert, et une orientation (jaune ou bleue) cohérente avec l'orientation du cercle. Quand des cercles sont imbriqués, on choisit des altitudes différentes dans $\mathbb{R}^3$ pour chacun, ainsi que pour le disque correspondant, de sorte que le cercle le plus intérieur ait l'altitude la plus élevée.

Enfin, construisons S à partir de S' de la manière suivante : au voisinage de chacun des croisements supprimés, retirons deux segments de bord à S' et recollons un “rectangle tordu d'un demi-tour” correspondant au croisement initial en question. Ce rectangle tordu est d'une des deux formes suivantes selon le signe du croisement initial :



La surface S ainsi construite est bien une surface plongée compacte connexe orientée de bord l'entrelacs L . $\square$

Définition 4.13. Soit L un entrelacs de $\mathbb{S}^3$. Une *surface d'algorithme* de L est une surface de Seifert de L construite via l'*algorithme de Seifert* décrit dans la preuve précédente, en commençant avec un diagramme de L .

Exercice. (*Exercice 4.C*)

- (1) Montrer que le genre est bien un invariant d'entrelacs.
- (2) Soit L un entrelacs et $-L$ l'entrelacs obtenu en inversant les orientations de toutes les composantes de L . Montrer que $g(-L) = g(L)$.
- (3) Soit L un entrelacs. Montrer que $g(L^*) = g(L)$.

Exercice. (*Exercice 4.D*) Soit D un diagramme d'entrelacs à $c(D)$ croisements, et S une surface d'algorithme construite depuis D , avec $s(D)$ cercles de Seifert.

(1) Montrer que la caractéristique d'Euler de S est :

$$\chi(S) = s(D) - c(D).$$

(2) En déduire que

$$g(S) = \frac{2 - s(D) + c(D) - \mu(L)}{2},$$

où L est l'entrelacs associé à D .

En tant qu'invariant défini comme un minimum sur une infinité de possibilités, le genre d'un entrelacs est difficile à calculer. Il est en revanche aisé d'en obtenir une borne supérieure via l'algorithme de Seifert par exemple.

Proposition 4.14. Soit K un nœud. Alors $g(K) = 0$ si et seulement si K est le nœud trivial.

En d'autres termes, le genre détecte le nœud trivial parmi tous les nœuds.

Démonstration. Nous admettrons la preuve de la Proposition 4.14. Une façon de s'en convaincre est d'isotoper un disque plongé (et son bord le nœud de genre zéro) le long de lui-même jusqu'à un petit voisinage d'un de ses points, voisinage qui ressemble alors à un disque classique. $\square$

La Proposition 4.14 ne se généralise pas aux entrelacs, comme on peut le voir dans l'exercice suivant.

Exercice. (Exercice 4.G) Considérons les trois entrelacs L, L', L'' de la Figure 31.

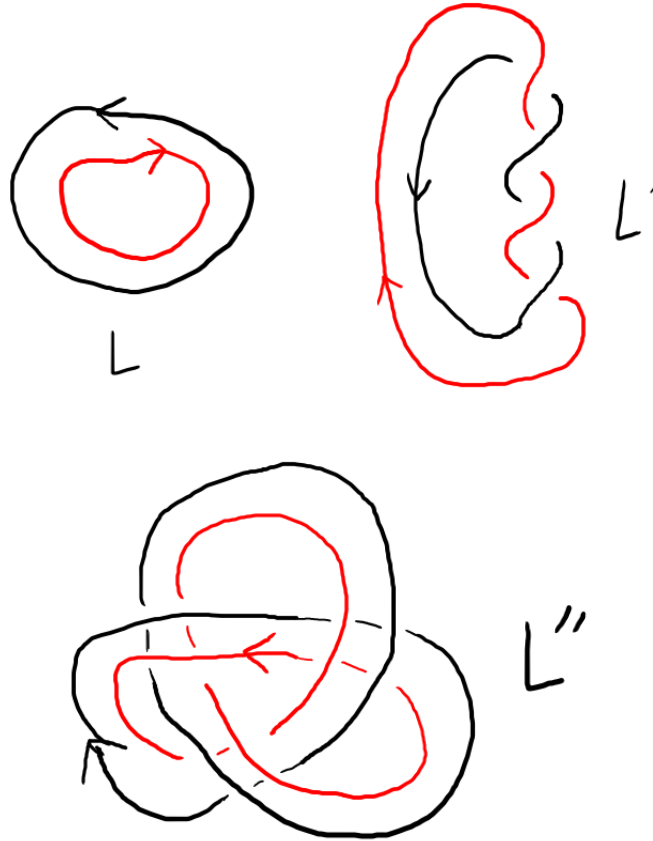


FIGURE 31. Trois entrelacs différents mais de genre nul

(1) Montrer qu'ils appartiennent à trois classes d'équivalence différentes.

(2) Montrer qu'ils ont tous les trois un genre zéro.

Définition 4.15. Soit $L = L_1 \cup \dots \cup L_m$ et $L' = L'_1 \cup \dots \cup L'_p$ deux entrelacs. La *somme connexe* de L et L' le long des composantes L_i et L'_j est l'entrelacs à $m+p-1$ composantes

$$L \#_{L'_j} L' := L_1 \cup \dots \cup L_{i-1} \cup L_{i+1} \cup \dots \cup L_m \cup (L_i \# L'_j) \cup L'_1 \cup \dots \cup L'_{j-1} \cup L'_{j+1} \cup \dots \cup L'_p,$$

où l'on a pris des représentants de L et L' tels que leurs composantes ne s'intersectent pas et que la somme connexe de nœuds $L_i \# L'_j$ ait du sens.

Remarquons que l'ordre des composantes choisi ici n'est pas canonique dans la littérature.

Théorème 4.16. *Le genre des nœuds est additif par la somme connexe. En d'autres termes, pour tous nœuds J et K , on a $g(J \# K) = g(J) + g(K)$.*

Nous admettrons le Théorème 4.16. Il existe une généralisation aux sommes connexes d'entrelacs, mais seulement quand la somme connexe en question vérifie certaines propriétés (voir [Cro, Section 5.6] pour la preuve et la généralisation). On peut néanmoins démontrer plus facilement l'inégalité suivante :

Exercice. (Exercice 4.E) Soient L et L' deux entrelacs, et $L \# L'$ une somme connexe de L et L' . Montrer que $g(L \# L') \leq g(L) + g(L')$.

Une conséquence du Théorème 4.16 est le fait que tout nœud admet un nombre fini de facteurs premiers.

Exercice. (Exercice 4.F) Soit K un nœud. Montrez qu'il existe une constante $C(K) \in \mathbb{N}$ telle que toute décomposition de K en facteurs premiers a moins de $C(K)$ facteurs.

L'unicité des facteurs premiers est plus difficile à démontrer (voir [Cro, Theorem 4.5.2])

Équivalence de surfaces (pas vu en cours).

Définition 4.17. Soit S, S' des surfaces plongées (i.e. compactes connexes orientées dans S^3). On dit que S' est obtenue de S par *ajout de tube* si

- il existe un cylindre plein plongé $\mathbb{B}^2 \times [0, 1] \xrightarrow{\phi} C \subset S^3$ tel que $C \cap S = \phi(\mathbb{B}^2 \times \{0, 1\})$,
- $S' = (S \setminus C \cap S) \cup \phi(\mathbb{S}^1 \times [0, 1])$.

Deux surfaces plongées orientées S, S' sont *T-équivalentes* si elles sont reliées par un nombre fini d'isotopies ambiantes et d'ajouts ou retraites de tubes.

On va voir au Théorème 4.22 qu'une équivalence de deux entrelacs se traduit en T-équivalence de leurs surfaces de Seifert.

Définition 4.18. Une *surface en bandes* est une surface plongée admettant une projection planaire du type de la Figure 32, i.e. donnée par un disque sur le bord duquel on recolle une série de bandes rectangulaires, chaque recollement se faisant le long de deux segments disjoints, et les bandes pouvant être entortillées, se croiser et/ou suivre un diagramme de nœud. Voir [Cro, Chapter 5] ou [Sch, Definition 1.4].

Lemme 4.19. *Toute surface de Seifert est isotope (donc T-équivalente) à une surface en bandes.*

Démonstration. L'idée est de partir d'une présentation de la surface comme CW-complexe, et de se ramener par isotopie à un voisinage du 1-squelette. Voir [Sch, Lemma 1.5] pour plus de détails. $\square$

Lemme 4.20. *Toute surface en bandes est T-équivalente à une surface d'algorithme.*

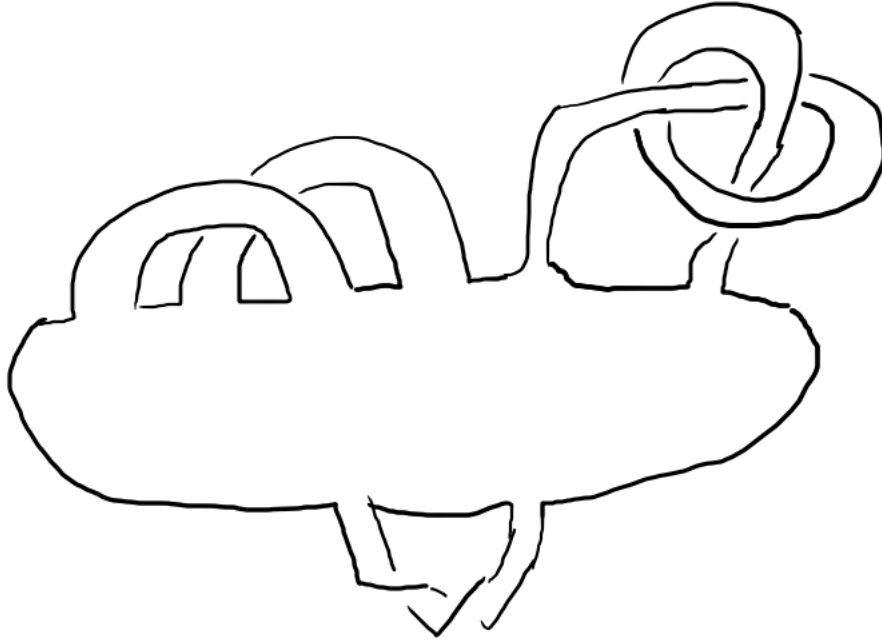


FIGURE 32. Surface en bandes

Démonstration. En commençant avec une surface en bandes S de bord l'entrelacs L , soit D un diagramme de L correspondant à une projection planaire en bandes de S , et soit S' la surface d'algorithme associée à D . On montre que S et S' sont T -équivalentes en étudiant les différents cas possibles avec les bandes de S . Notamment, un croisement de bandes impliquera l'ajout d'un tube pour passer de S à S' . Voir [Sch, Lemma 1.8] et [Cro, Lemma 5.5.4] pour plus de détails. $\square$

Lemme 4.21. *Si D et D' sont R -équivalents, alors leurs surfaces d'algorithmes sont T -équivalentes.*

Démonstration. On démontre le résultat pour chaque mouvement de Reidemeister parmi R1a, R1c, R2c, R2d et R3b, qui forment une famille génératrice au sens de Polyak, cf [Po, Theorem 1.2]. Voir [Sch, Lemma 1.9] et [Cro, Lemma 5.5.5] pour plus de détails. $\square$

Théorème 4.22. *Des surfaces de Seifert d'entrelacs équivalents sont T -équivalentes.*

Démonstration. Le résultat découle des trois lemmes précédents. $\square$

4.3. Forme et matrice de Seifert. Soit L un entrelacs et $S \cong \Sigma_{g,b}$ une surface de Seifert de L .

On a $H_1(S, \mathbb{Z}) \cong \mathbb{Z}^{2g+b-1} = \mathbb{Z}^{1-\chi(S)}$, et

- chaque anse donne 2 vecteurs de base (des lacets),
- chaque trou (après le premier) donne 1 vecteur de base (un lacet encerclant le trou).

Soit $\mathcal{B} = (a_1, \dots, a_{2g+b-1})$ une telle base de l'homologie.

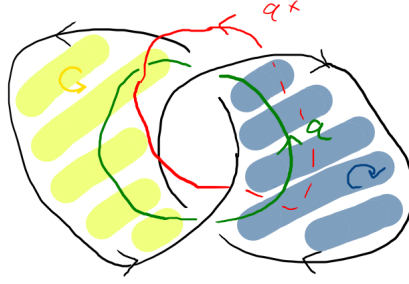
Définition 4.23. La *forme de Seifert* de S est la forme bilinéaire

$$\begin{aligned} \Theta_S : H_1(S) \times H_1(S) &\rightarrow \mathbb{Z} \\ (a_i, a_j) &\mapsto \text{lk}(a_i, a_j^+), \end{aligned}$$

où a_j^+ est le lacet isotope à a_j poussé vers le haut.

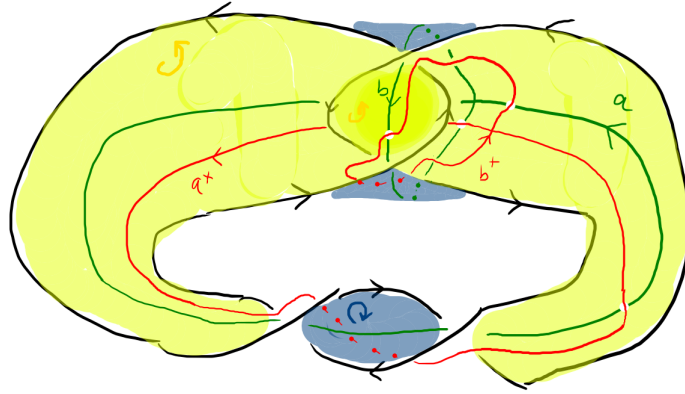
Définition 4.24. La *matrice de Seifert* $V_{S,\mathcal{B}}$ associée à S et $\mathcal{B}$ est la matrice de la forme Θ_S dans la base $\mathcal{B}$.

Exemple 4.25. Entrelacs de Hopf :



$$S \cong \Sigma_{0,2}, \quad V = a \begin{bmatrix} a^+ \\ -1 \end{bmatrix}.$$

Exemple 4.26. Nœud de huit :



$$S \cong \Sigma_{1,1}, \quad V = \begin{matrix} a^+ & b^+ \\ a & b \end{matrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Proposition 4.27. Soit L un entrelacs et V une matrice de Seifert de L . Alors :

- (1) V^T est une matrice de Seifert de $-L$,
- (2) $-V^T$ est une matrice de Seifert de L^* .

Définition 4.28. Un nœud K est *amphichéral* si $K \sim K^*$.

Le *type de symétrie* d'un nœud K est l'ensemble des classes d'équivalences parmi $\{K, K^*, -K, -K^*\}$ (5 cas possibles, voir *Knotinfo* pour le vocabulaire précis).

Pour un entrelacs à $m \geq 2$ composantes, encore plus de cas sont possibles.

Le type de symétrie est un invariant d'entrelacs.

4.4. Signature.

Définition 4.29. Soit $V \in M_n(\mathbb{Z}), W \in M_p(\mathbb{Z})$. Elles sont *S-équivalentes* si elles sont reliées par une suite finie de mouvements parmi :

- *congruence* : $M \mapsto P^T M P$ avec $P \in GL_k(\mathbb{Z})$,
- *élargissement/réduction* :

$$\begin{pmatrix} M & \star & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightsquigarrow M \rightsquigarrow \begin{pmatrix} M & 0 & 0 \\ \star & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

où $\star$ est une ligne/colonne d'entiers.

Proposition 4.30. Soient S, S' deux surfaces plongées T -équivalentes, et $\mathcal{B}, \mathcal{B}'$ des bases de $H_1(S), H_1(S')$. Alors $V_{S, \mathcal{B}}$ et $V_{S', \mathcal{B}'}$ sont S -équivalentes.

La classe de S -équivalence d'une matrice de Seifert est donc un invariant d'entrelacs.

Définition 4.31. Soit L un entrelacs et V une surface de Seifert de L . La *signature* $\sigma(L) \in \mathbb{Z}$ est définie par :

$$\sigma(L) := \text{sign}(V + V^T) \in \mathbb{Z},$$

i.e. la différence entre le nombre de valeurs propres > 0 et < 0 de la matrice symétrique $V + V^T$. C'est un invariant d'entrelacs.

Remarque 4.32. Rappelons qu'il existe plusieurs moyens classiques de calculer la signature d'une matrice symétrique $M \in M_m(\mathbb{Z})$. Par exemple, on peut écrire la forme quadratique associée

$$q(x_1, \dots, x_m) = (x_1, \dots, x_m) \cdot M \cdot (x_1, \dots, x_m)^T$$

et la décomposer en sommes et différences de carrés selon l'algorithme de Gauss.

Proposition 4.33. Soit L, L' des entrelacs.

- (1) $\sigma(K)$ est pair si K est un nœud.
- (2) $\sigma(-L) = \sigma(L)$.
- (3) $\sigma(L^*) = -\sigma(L)$. En particulier $L \sim L^* \Rightarrow \sigma(L) = 0$.
- (4) $\sigma(L \# L') = \sigma(L) + \sigma(L') = \sigma(L \sqcup L')$.

Exercice. (Exercice 4.H) Montrer que 3_1 et 3_1^* ne sont pas équivalents.

La signature donne également une **borne inférieure sur le nombre de dénouement** :

Proposition 4.34. Pour tout nœud K , on a

$$\frac{1}{2} |\sigma(K)| \leq u(K).$$

L'idée de la preuve de cette proposition est qu'un changement de croisement va changer la matrice de Seifert V localement et la signature de 0 ou ± 2 .

4.5. Polynôme d'Alexander, Définition S.

Définition 4.35. Soit L un entrelacs et V une surface de Seifert de L . Le *déterminant* de L est défini par $\det(L) := |\det(V + V^T)| \in \mathbb{N}$.

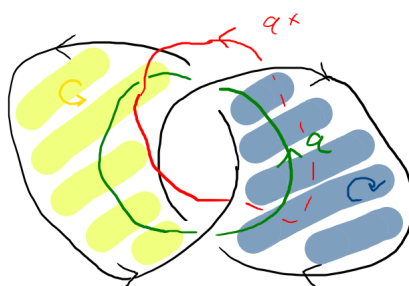
Définition 4.36 (Définition S). Soit L un entrelacs et V une surface de Seifert de L . Le *polynôme d'Alexander* (à une variable) de L est

$$\Delta_L(t) := \det(tV - V^T) \in \mathbb{Z}[t, t^{-1}] / \{\pm t^{\mathbb{Z}}\}.$$

Proposition 4.37. Soit L un entrelacs.

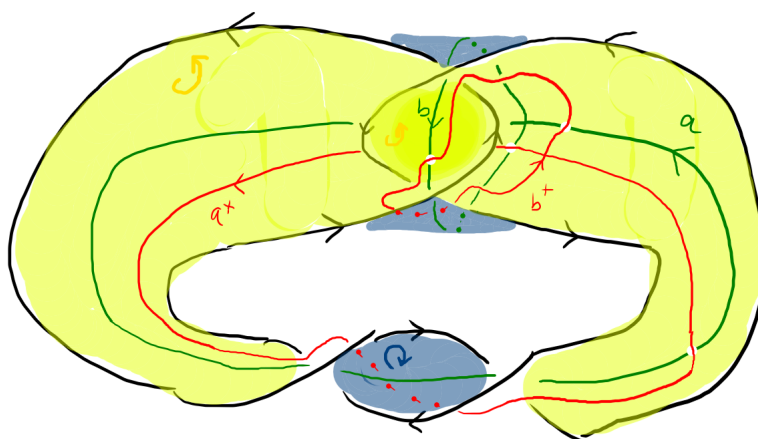
- (1) $\Delta_L(t) \doteq \Delta_{-L}(t) \doteq \Delta_{L^*}(t) \doteq \Delta_L(\frac{1}{t})$.
- (2) $\Delta_L(1) = \pm 1$ si L est un nœud et $\Delta_L(1) = 0$ sinon.
- (3) $\Delta_{L \# L'}(t) = \Delta_L(t) \cdot \Delta_{L'}(t)$.
- (4) $\Delta_{L \sqcup L'}(t) = 0$.
- (5) $\deg(\Delta_L(t)) \leq 2g(L) + \mu(L) - 1$.
- (6) $\deg(\Delta_K)$ est pair si K est un nœud.

Exemple 4.38. L'entrelacs de Hopf :



$$S \cong \Sigma_{0,2}, \quad V = {}^a \begin{bmatrix} a^+ \\ -1 \end{bmatrix}, \quad \sigma(L) = -1, \quad \Delta_L(t) \doteq -(t-1).$$

Exemple 4.39. Le nœud de huit :



$$S \cong \Sigma_{1,1}, \quad V = {}^a_b \begin{bmatrix} a^+ & b^+ \\ -1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \sigma(L) = 0, \quad \Delta_L(t) \doteq t^2 - 3t + 1.$$

Remarque 4.40. Comparons les Définitions A et S.

La Définition A ne s'applique qu'aux nœuds, et le temps de calcul est polynomial en le nombre de croisements.

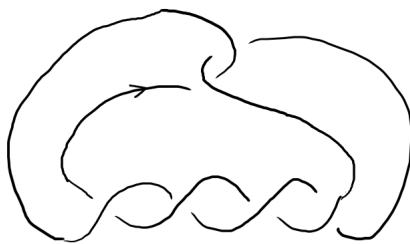
La Définition S s'applique aux entrelacs, et son temps de calcul est polynomial en le genre (ce qui peut être mieux qu'en le nombre de croisements), mais nécessite de construire la surface et la matrice de Seifert.

Il n'est pas encore clair pourquoi la Définition S généralise la Définition A.

En revanche, on peut prouver la relation entre les Définitions S et X, en montrant que la Définition S admet une normalisation qui vérifie la relation skein (pour cela on raisonne localement sur l'effet du changement de croisement sur la surface et sa matrice).

Étude de deux exemples.

Exercice. (*Exercice 4.1*) Soit K le nœud 5_2 .



(1) Montrer que K est inversible (i.e. $K \sim -K$).

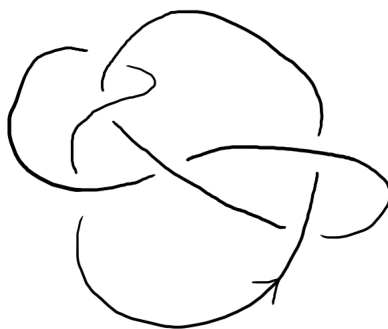
(2) Montrer que $\Delta_K(t) \doteq 2t^2 - 3t + 2$.

(3) Montrer que $\sigma(K) = -2$.

(4) Montrer que $g(K) = 1$.

Exercice. (Exercice 4.J)

Soit K le nœud 6_3 .



(1) Montrer que K est équivalent à $-K^*$. **Attention ! Initialement l'énoncé utilisait K^* au lieu de $-K^*$, ce qui est correct mais plus difficile à démontrer !**

(2) Montrer que $\Delta_K(t) \doteq t^4 - 3t^3 + 5t^2 - 3t + 1$.

(3) Montrer que $\sigma(K) = 0$.

4.6. Exercices Séance 4 (13 mars 2026) : Surfaces de Seifert et Définition S.

Exercice 4.A (Exercice 1.I). Soit $L = (L_1, L_2)$ un entrelacs à deux composantes de diagramme D et $L' := L_1 \sqcup L_2$.

(1) Montrer qu'il existe une famille de croisements de D entre L_1 et L_2 tels que si l'on inverse les signes de ces croisements, on obtient un diagramme D' de L' .

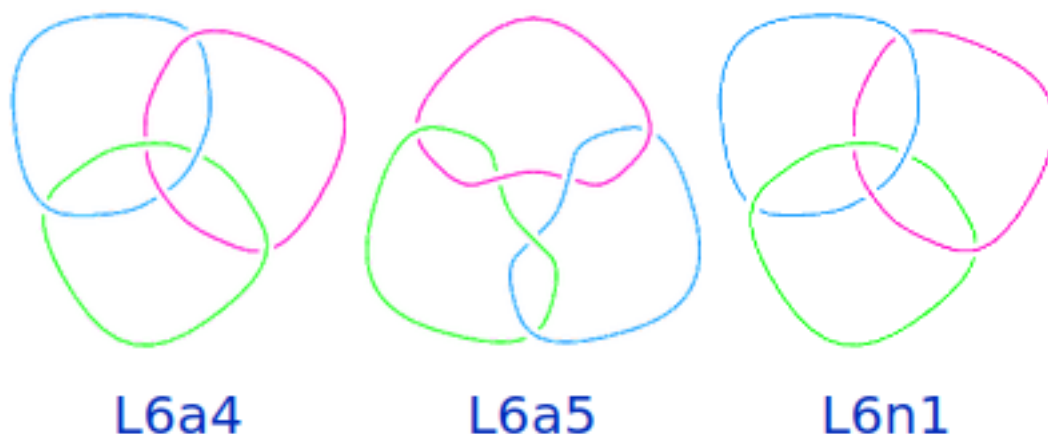
(2) Montrer que changer le signe d'un croisement ne change pas la parité de

$$\sum_{\substack{c \text{ croisement} \\ \text{entre } L_1 \text{ et } L_2}} \epsilon(c).$$

(3) Calculer le nombre d'enlacement de L' .

(4) Conclure que le nombre d'enlacement de L est entier.

Exercice 4.B (Exercice 1.J). Calculer les matrices d'enlacement des 3 entrelacs premiers à 3 composantes et 6 croisements (cf Thistlethwaite Link Table et dessin ci-dessous).



Exercice 4.C. (1) Montrer que le genre est bien un invariant d'entrelacs.

(2) Soit L un entrelacs et $-L$ l'entrelacs obtenu en inversant les orientations de toutes les composantes de L . Montrer que $g(-L) = g(L)$.

(3) Soit L un entrelacs. Montrer que $g(L^*) = g(L)$.

Exercice 4.D. Soit D un diagramme d'entrelacs à $c(D)$ croisements, et S une surface d'algorithme construite depuis D , avec $s(D)$ cercles de Seifert.

(1) Montrer que la caractéristique d'Euler de S est :

$$\chi(S) = s(D) - c(D).$$

(2) En déduire que

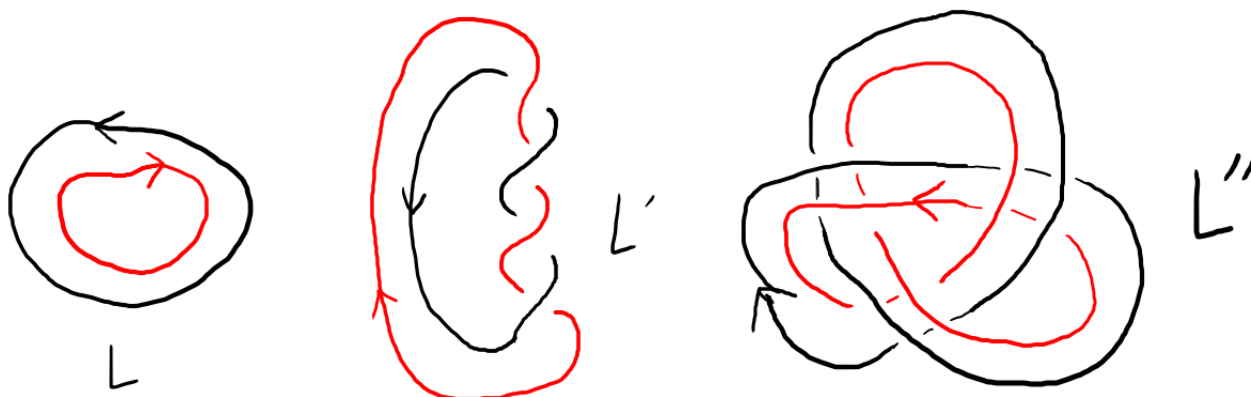
$$g(S) = \frac{2 - s(D) + c(D) - \mu(L)}{2},$$

où L est l'entrelacs associé à D .

Exercice 4.E. Soient L et L' deux entrelacs, et $L \sharp L'$ une somme connexe de L et L' . Montrer que $g(L \sharp L') \leq g(L) + g(L')$.

Exercice 4.F. Soit K un nœud. Montrez que toute décomposition de K en facteurs premiers a moins de $g(K)$ facteurs.

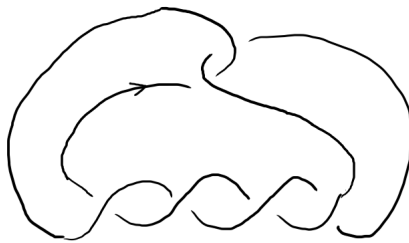
Exercice 4.G. Considérons les trois entrelacs L, L', L'' de la figure ci-après.



- (1) Montrer qu'ils appartiennent à trois classes d'équivalence différentes.
- (2) Montrer qu'ils ont tous les trois un genre zéro.

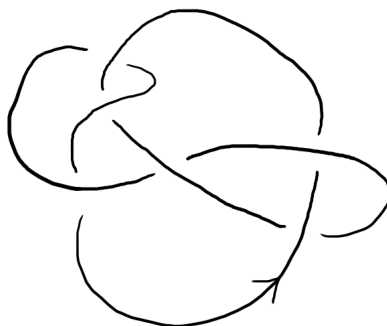
Exercice 4.H. En utilisant la signature, montrer que 3_1 et 3_1^* ne sont pas équivalents.

Exercice 4.I. Soit K le nœud 5_2 .



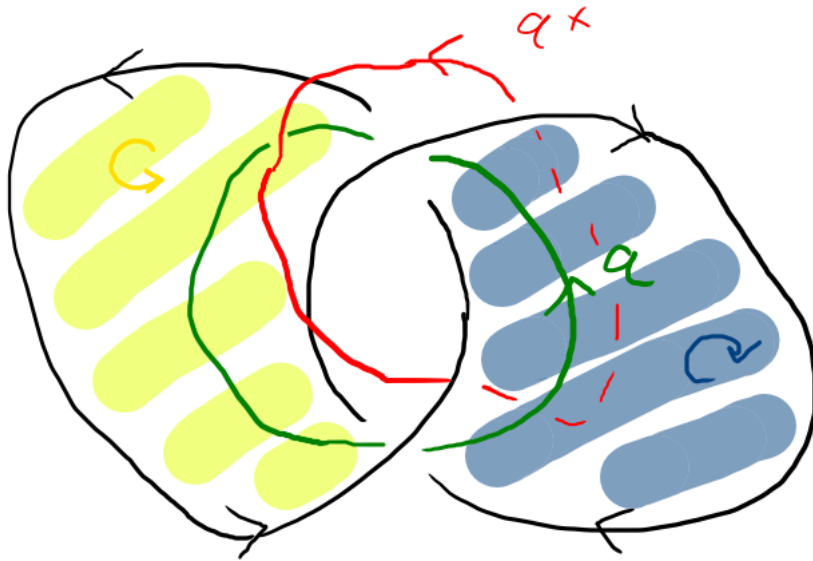
- (1) Montrer que K est inversible (i.e. $K \sim -K$).
- (2) Montrer que $\Delta_K(t) \doteq 2t^2 - 3t + 2$.
- (3) Montrer que $\sigma(K) = -2$.
- (4) Montrer que $g(K) = 1$.

Exercice 4.J. Soit K le nœud 6_3 .



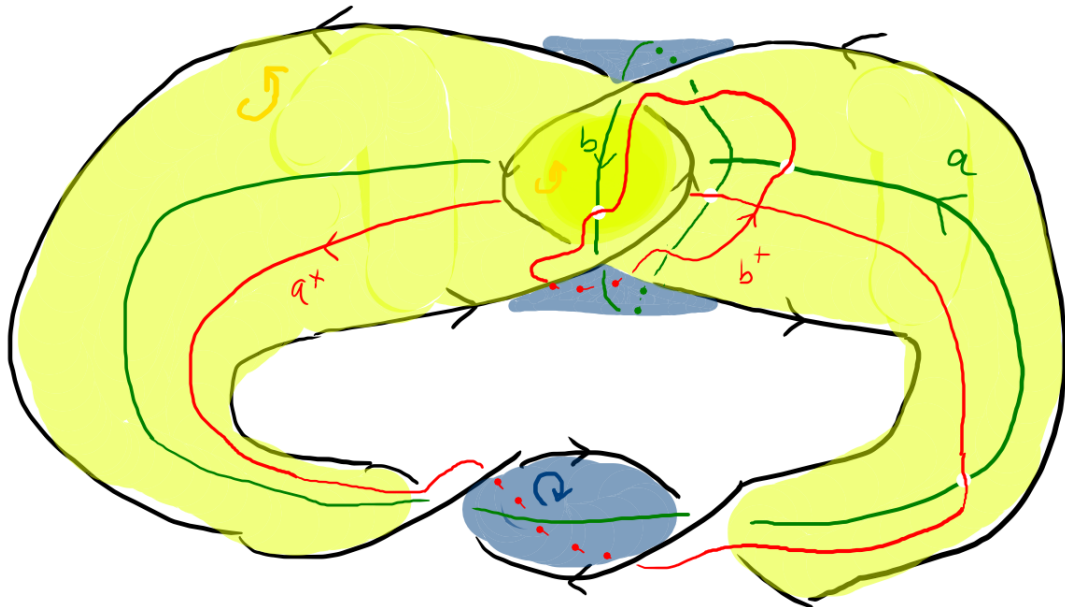
- (1) Montrer que K est équivalent à $-K^*$. **C'est vrai aussi pour K^* au lieu de $-K^*$, mais plus difficile à démontrer !**
- (2) Montrer que $\Delta_K(t) \doteq t^4 - 3t^3 + 5t^2 - 3t + 1$.
- (3) Montrer que $\sigma(K) = 0$.

Surface d'algorithme pour l'entrelacs de Hopf positif $H_+ = T(2, 2)$:



$$S \cong \Sigma_{0,2}, \quad V = {}_a \begin{bmatrix} a^+ \\ -1 \end{bmatrix}, \quad \sigma(L) = -1, \quad \Delta_L(t) \doteq -(t-1).$$

Surface d'algorithme pour le nœud de huit 4_1



$$S \cong \Sigma_{1,1}, \quad V = {}_a^b \begin{bmatrix} a^+ & b^+ \\ -1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \sigma(L) = 0, \quad \Delta_L(t) \doteq t^2 - 3t + 1.$$

Remarque : les feuilles de couleur qui précèdent sont là pour être imprimées en couleur en recto-verso, pour pouvoir découper des surfaces, des bandelettes, des rectangles de croisements, etc.

4.7. Corrections des exercices.

Exercice 4.C :

- (1) Montrer que le genre est bien un invariant d'entrelacs.
- (2) Soit L un entrelacs et $-L$ l'entrelacs obtenu en inversant les orientations de toutes les composantes de L . Montrer que $g(-L) = g(L)$.
- (3) Soit L un entrelacs. Montrer que $g(L^*) = g(L)$.

Pour tout entrelacs L , notons $\mathcal{S}(L)$ l'ensemble des surfaces de Seifert de L , i.e. les surfaces S plongées dans S^3 compactes connexes orientées de bord L .

(1) Soient L, L' deux entrelacs équivalents et $\phi: S^3 \rightarrow S^3$ un difféomorphisme respectant l'orientation et tel que $\phi(L) = L'$. Montrons que $g(L) = g(L')$.

Soit $F_\phi: \mathcal{S}(L) \rightarrow \mathcal{S}(L')$ l'application qui à chaque $S \in \mathcal{S}(L)$ associe $\phi(S)$. Alors F_ϕ est bien définie car les propriétés d'être une surface, d'être compact, d'être connexe et d'être orientée sont toutes préservées par application du difféomorphisme ϕ , et le bord L est bien envoyé sur le bord $\phi(L) = L'$. De plus F_ϕ est bijective, d'inverse $F_{\phi^{-1}}$.

Notons F_g l'application allant d'un ensemble de surfaces plongées dans un ensemble d'entiers naturels, envoyant une surface sur son genre.

Comme le genre est préservé par difféomorphisme, on a $F_g \circ F_\phi = F_g$.

Ainsi, $g(L) = \min F_g(\mathcal{S}(L)) = \min F_g(F_\phi(\mathcal{S}(L))) = \min F_g(\mathcal{S}(L')) = g(L')$.

(2) Soit F° l'application involutive entre deux ensembles de surfaces plongées connexes compactes orientées, qui envoie toute surface sur la même surface avec l'orientation opposée.

Alors $F^\circ(\mathcal{S}(L)) = \mathcal{S}(-L)$, et $F_g \circ F^\circ = F_g$ car le genre d'une surface ne dépend pas de son orientation.

D'où $g(-L) = \min F_g(\mathcal{S}(-L)) = \min F_g(F^\circ(\mathcal{S}(L))) = \min F_g(\mathcal{S}(L)) = g(L)$.

(3) Soit $\sigma: S^3 \rightarrow S^3$ un difféomorphisme involutif renversant l'orientation induit par une réflexion de $\mathbb{R}^3$, et $F_\sigma: S \mapsto \sigma(S)$ l'application induite sur l'ensemble des surfaces plongées dans S^3 .

Par le même type d'arguments qu'au (1) et au (2), et comme $\sigma(L) \sim L^*$, on a $F_\sigma(\mathcal{S}(L)) = \mathcal{S}(L^*)$ et $g(L^*) = g(L)$.

Exercice 4.D : Soit D un diagramme d'entrelacs à $c(D)$ croisements, et S une surface d'algorithme construite depuis D , avec $s(D)$ cercles de Seifert.

- (1) Montrer que la caractéristique d'Euler de S est :

$$\chi(S) = s(D) - c(D).$$

- (2) En déduire que

$$g(S) = \frac{2 - s(D) + c(D) - \mu(L)}{2},$$

où L est l'entrelacs associé à D .

(1) Chaque cercle de Seifert contribue d'un disque à la surface S , donc à un terme $+1$ dans $\chi(S)$. Chaque rectangle de croisement contribue à un terme -1 , car il a par exemple une décomposition cellulaire avec une 2-cellule et deux 1-cellules.

(2) Immédiat grâce à la valeur de $\chi(S)$ et le fait que $\# \partial S = \mu(L)$.

Exercice 4.E : Soient L et L' deux entrelacs, et $L \sharp L'$ une somme connexe de L et L' . Montrer que $g(L \sharp L') \leq g(L) + g(L')$.

On construit S'' une surface de Seifert pour $L \sharp L'$ comme une somme connexe sur le bord de S, S' surfaces de Seifert de genre minimal pour L et L' . Alors $g(S'') = g(S) + g(S') = g(L) + g(L')$, d'où le résultat.

Exercice 4.F : Soit K un nœud. Montrez qu'il existe une constante $C(K) \in \mathbb{N}$ telle que toute décomposition de K en facteurs premiers a moins de $C(K)$ facteurs.

Si $K = U$, alors il a 0 facteurs premiers, et on prend $C(K) := 0$.

Si $K = \sharp_{i=1}^r K_i$ avec K_i premiers (donc $\neq U$) et $r \geq 1$, alors

$$g(K) = \sum_{i=1}^r g(K_i) \geq \sum_{i=1}^r 1 = r,$$

Donc pour $C(K) := g(K)$ on a bien tout r inférieur à $C(K)$.

Exercice 4.G : Considérons les trois entrelacs L, L', L'' de la Figure 31.

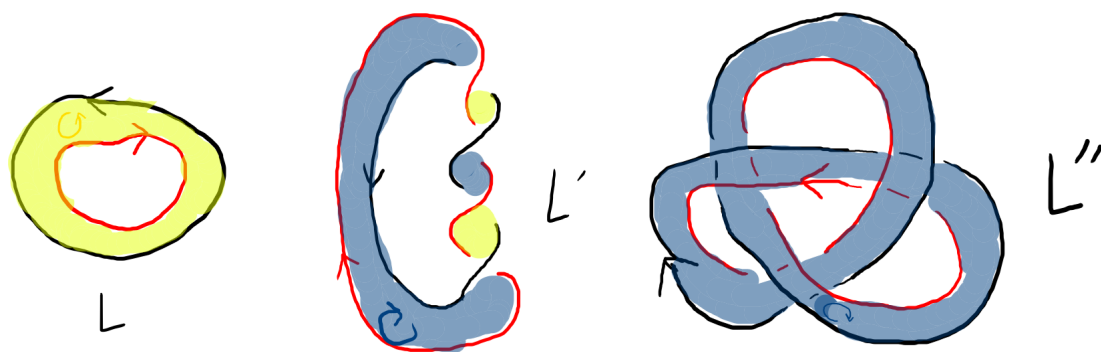
(1) Montrer qu'ils appartiennent à trois classes d'équivalence différentes.

(2) Montrer qu'ils ont tous les trois un genre zéro.

(1) Les composantes de L et L' sont toutes des nœuds triviaux, mais celles de L'' sont deux nœuds de trèfle, L'' n'est donc équivalent à aucun des deux autres.

D'autre part, $\text{lk}(L) = 0$ et on calcule que $\text{lk}(L') = -2$, donc L et L' ne sont pas équivalents.

(2) Ces trois entrelacs bordent des anneaux plongés (voir figure ci-après), qui sont des surfaces de genre 0, donc ces entrelacs ont un genre nul.



Exercice 4.H : Montrer que 3_1 et 3_1^ ne sont pas équivalents.*

On va montrer que $\sigma(3_1) \neq 0$ et utiliser la Proposition 4.33 (3).

La construction d'une surface d'algorithme pour 3_1 est similaire à celle de l'Exemple 4.38 de l'entrelacs de Hopf, avec trois croisements positifs au lieu de deux. On trouve alors une possible matrice de Seifert

$$V = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix},$$

ce qui donne $V + V^T = \begin{pmatrix} -2 & 1 \\ 1 & -2 \end{pmatrix}$, de forme quadratique associée

$$q(x, y) = -2x^2 + 2xy - 2y^2 = -x^2 - (x - y)^2 - y^2 < 0.$$

On aurait pu aussi utiliser l'algorithme de Gauss pour conclure au caractère défini négatif de q .

On calcule la signature de 3_1 et on trouve donc

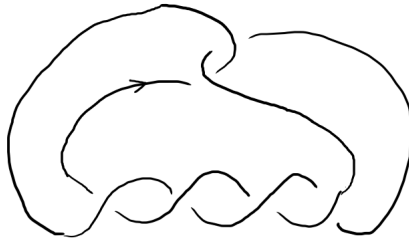
$$\sigma(3_1) = \text{sign}(V + V^T) = -2,$$

en particulier $\sigma(3_1) \neq 0$, donc par contraposée de la Proposition 4.33 (3), on en conclut que 3_1 et 3_1^* ne sont pas équivalents.

Remarquons qu'on a aussi

$$\sigma(3_1^*) = 2.$$

Exercice 4.I : Soit K le nœud 5_2 .



(1) Montrer que K est inversible (i.e. $K \sim -K$).

(2) Montrer que $\Delta_K(t) \doteq 2t^2 - 3t + 2$.

(3) Montrer que $\sigma(K) = -2$.

(4) Montrer que $g(K) = 1$.

(Stratégie) Les questions (3) et (4) nous demandent de calculer le genre et la signature, qui nécessitent d'utiliser une surface de Seifert. Sachant cela, on comprend qu'il est pertinent d'utiliser la Définition S pour le (2).

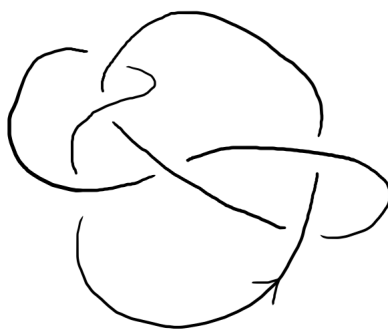
(1) Soit une droite comprise dans le plan du diagramme, verticale. Alors l'image du diagramme de 5_2 par une rotation de $\mathbb{R}^3$ d'angle π autour de cette droite est un diagramme identique excepté que le sens de parcours a changé (en examen, il faut bien le justifier avec des dessins). Ainsi, $K \sim -K$.

(2, 3) La surface d'algorithme construite ressemble à celle de l'Exemple 4.39, excepté que les deux croisements du haut sont inversés (ce qui change des poussés vers le haut et des nombres d'enlacements) et qu'il y a 4 croisements en bas et non 2.

Les calculs de $\sigma(K)$ et $\Delta_K(t)$ sont alors standards, et ne seront pas détaillés ici.

(4) La surface d'algorithme construite ici est de genre 1, donc $g(K) \leq 1$. Mais le degré de $\Delta_K(t)$ est 2, donc par la Proposition 4.37 (5), on a $g(K) \geq 1$ (on aurait aussi pu utiliser le fait que U est le seul nœud de genre 0 et que $K \neq U$ via un des invariants précédemment calculés). D'où le résultat.

Exercice 4.J : Soit K le nœud 6_3 .



(1) Montrer que K est équivalent à $-K^*$. **Attention ! Initialement l'énoncé utilisait K^* au lieu de $-K^*$, ce qui est correct mais plus difficile à démontrer !**

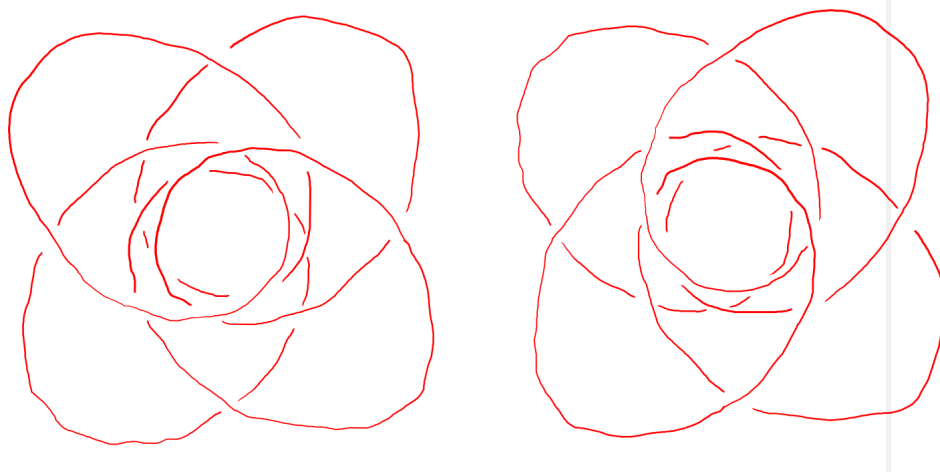
(2) Montrer que $\Delta_K(t) \doteq t^4 - 3t^3 + 5t^2 - 3t + 1$.

(3) Montrer que $\sigma(K) = 0$.

(Stratégie) Le (3) est conséquence du (1) via la Proposition 4.37 (5), donc on peut se passer de calculer une matrice de Seifert. Ainsi pour calculer $\Delta_K(t)$ au (2) on peut utiliser la Définition A, qui a l'air la plus pratique ici (en effet, au vu du résultat attendu, le genre $g(K)$ est au moins 2, ce qui rendra la forme de Seifert longue à calculer...)

(1) Comme montré pendant le cours, on prend le court brin montant tout à gauche, on l'allonge et on le fait passer sous le reste du diagramme, ce qui donne au diagramme une propriété utile : tous les brins tournent dans le sens positif autour d'un point. Ainsi un demi-tour dans l'espace nous permet de passer du dit diagramme à celui avec les croisements inversés et le sens de parcours changé. D'où $K \sim -K^*$. Nous vous suggérons bien sûr de vous entraîner à refaire les dessins.

(1 initial) On utilise la forme suivante de K et K^* , différents d'une rotation :



(2) On utilise la Définition A, et on s'arme de patience pour calculer le déterminant 6-6 en question (qui heureusement a beaucoup de zéros).

(3) Le (3) est conséquence du (1) via la Proposition 4.37 (5).

5. EXTÉRIEURS, GROUPES ET DÉFINITION G

5.1. Extérieurs d'entrelacs.

Définition 5.1. Soit L un entrelacs de S^3 .

On note $\nu L \cong \sqcup_{i=1}^{\mu(L)} (\mathbb{S}^1 \times \overset{\circ}{D}_2)$ un *voisinage tubulaire* (ouvert) de L (il en existe plusieurs). On peut par exemple en définir un point par point, où pour chaque point x de L on prend un petit disque normal à L en x (grâce au fait que L est lisse).

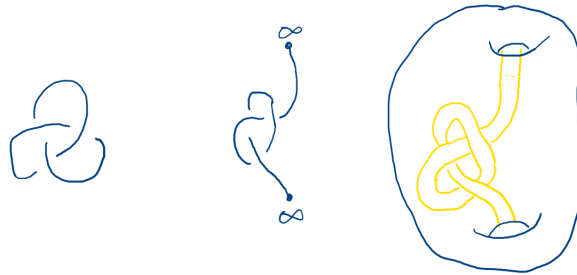
On note $C_L := S^3 \setminus L$ le *complémentaire* de L , qui est une variété ouverte.

On note enfin $E_L := S^3 \setminus \nu L$ l'*extérieur* de L , qui est une variété compacte à bord torique (∂E_L est une union disjointe de $\mu(L)$ tores).

Exemple 5.2. Pour le nœud trivial U , on a $C_U \cong \overset{\circ}{D}_2 \times \mathbb{S}^1$, et $E_U \cong D_2 \times \mathbb{S}^1$. On peut le voir en isotopant U comme une droite verticale dans $\mathbb{R}^3$ rencontrant le point ∞ en haut et en bas.

Exemple 5.3. Pour les entrelacs de Hopf, on a $E_{H_{\pm}} \cong \mathbb{S}^1 \times \mathbb{S}^1 \times [0, 1]$.

Plus généralement, l'image suivante décrit comment dessiner l'extérieur E_L comme une sous-variété de $\mathbb{R}^3$. Dans l'image L est un nœud (de trèfle) mais dans le cas où il y a plus de composantes, il suffit de creuser des tunnels supplémentaires appropriés.



5.2. Propriétés des extérieurs.

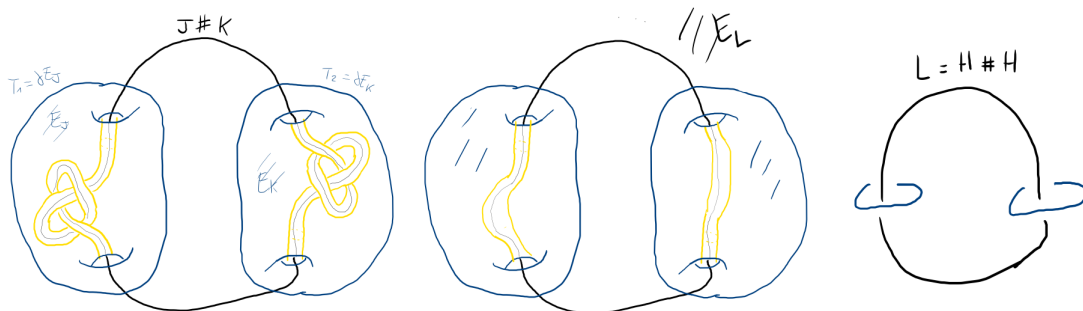
Définition 5.4. L'*entrelacs trousseau de clés* (keychain link) Tr_{n+1} à $n+1$ composantes est la somme connexe de n entrelacs de Hopf (positifs) tous sur la même composante $Tr_{n+1} = H \sharp \dots \sharp H$.

L'extérieur d'un tel entrelacs est $E_{Tr_{n+1}} \cong S^1 \times \Sigma_{0,n+1}$.

Proposition 5.5. Dans $E_{J \sharp K}$ on trouve deux tores incompressibles (i.e. π_1 -injectifs) T_1, T_2 , qui décomposent $E_{J \sharp K}$ ainsi :

$$E_{J \sharp K} = E_J \cup_{T_1} E_{H \sharp H} \cup_{T_2} E_K.$$

La figure ci-après illustre ce qui précède avec $J = K = 3_1$. Le morceau non borné de la figure de gauche est homéomorphe au morceau non borné de la figure centrale ("le tunnel ne sait pas qu'il est noué"), et ce même morceau non borné de la figure centrale est clairement l'extérieur de l'entrelacs Tr_3 de la figure de droite.



Comme le montre la proposition suivante, l'homologie de l'extérieur d'un entrelacs ne contient pas beaucoup d'information, seulement le nombre de composantes.

Proposition 5.6 ($H_1(E, \mathbb{Z})$ "ne voit pas les croisements"). *Soit K un nœud. Alors*

$$H_0(E_K) \cong \mathbb{Z}, \quad H_1(E_K) \cong \mathbb{Z}, \quad H_{\geq 2}(E_K) = 0.$$

Soit L un entrelacs. Alors

$$H_0(E_L) \cong \mathbb{Z}, \quad H_1(E_L) \cong \mathbb{Z}^{\mu(L)}, \quad H_2(E_L) \cong \mathbb{Z}^{\mu(L)-1}, \quad H_{\geq 3}(E_L) = 0.$$

Démonstration. On utilise la suite exacte longue de Mayer-Vietoris avec la décomposition $\mathbb{S}^3 = (\nu K) \cup_T E_K$. On peut trouver les détails dans [BZ, Theorem 3.1] $\square$

On peut se demander si l'extérieur détecte l'entrelacs. En fait c'est le cas pour les nœuds *non orientés* :

Théorème 5.7 (Gordon-Luecke, [BZ] Theorem 3.19 and Remark 3.20). *Soient J, K nœuds non orientés de $\mathbb{S}^3$. Alors on a $J \sim K$ si et seulement s'il existe $E_J \xrightarrow{\sim} E_K$ un homéomorphisme respectant l'orientation.*

Ce n'est en revanche pas le cas pour les entrelacs : il existe des entrelacs $L \approx L'$ mais tels que $E_L \not\cong E_{L'}$, comme ceux décrits sur la figure suivante.



5.3. Le groupe d'un entrelacs.

Définition 5.8. Soit L un entrelacs dans S^3 . Alors $G_L := \pi_1(\mathbb{S}^3 \setminus L, *) \cong \pi_1(E_L, *)$ est le *groupe* de L , un invariant.

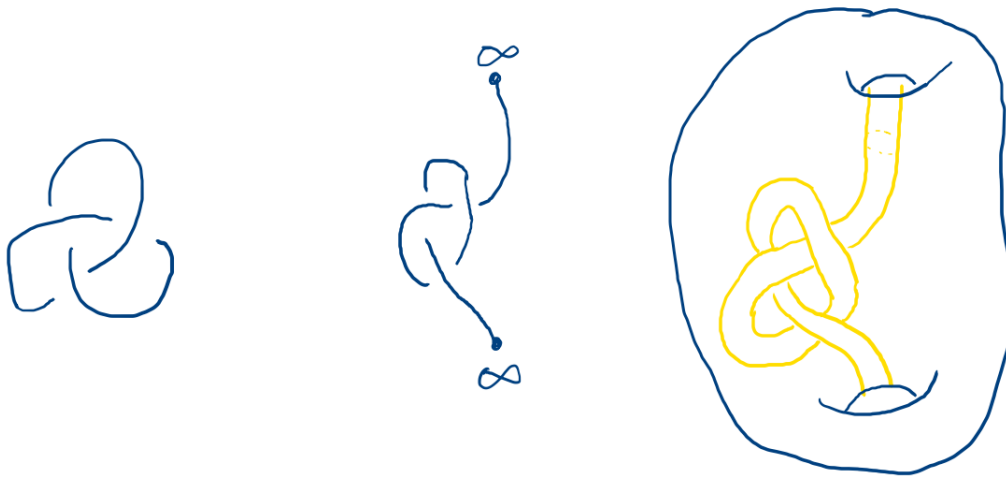
Exemple 5.9. (1) $G_U \cong \mathbb{Z}$.

(2) $G_{H_{\pm}} \cong \mathbb{Z}^2$.

Proposition 5.10. *Pour tout entrelacs L différent de U, H_+, H_- , le groupe G_L est non abélien.*

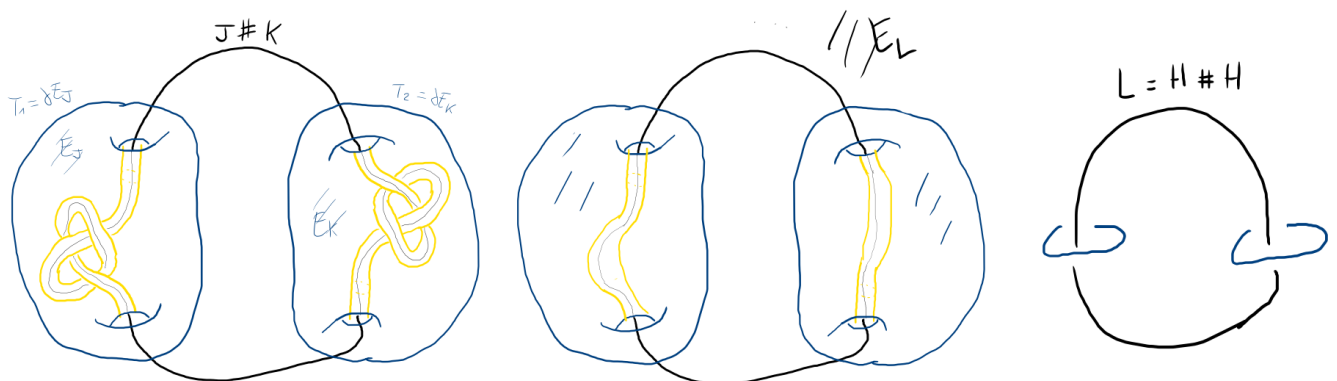
Le groupe est un invariant *puissant*, mais *difficile à manipuler*.

L'extérieur E_K d'un nœud K vu comme une sous-variété de $\mathbb{R}^3$, une boule avec un tunnel noué creusé.



L'extérieur $E_{J\#K}$ d'une somme connexe $J\#K$ admet deux tores incompressibles T_1, T_2 tels que

$$E_{J\#K} = E_J \cup_{T_1} E_{H\#H} \cup_{T_2} E_K$$



5.4. Matrice de présentation d'un module.

Définition 5.11. Soit G un groupe. L'anneau de groupe associé à G est

$$\mathbb{Z}G := \left\{ \sum_{g \in G} n_g \cdot g \mid n_g \in \mathbb{Z}, n_g \neq 0 \text{ pour un nombre fini de } g \right\}.$$

Exemple 5.12. Pour $G = 1$, $\mathbb{Z}G \cong \mathbb{Z}$.

Exemple 5.13. Pour $G = \mathbb{Z}$, $\mathbb{Z}G \cong \mathbb{Z}[t^{\mathbb{Z}}] = \mathbb{Z}[t, t^{-1}]$ est l'anneau des polynômes de Laurent à une variable et à coefficients entiers, noté R_t .

Exemple 5.14. Pour $G = \mathbb{Z}^n$, $\mathbb{Z}G \cong \mathbb{Z}[t_1^{\mathbb{Z}} \dots t_n^{\mathbb{Z}}] = \mathbb{Z}[t_1, t_1^{-1}, \dots, t_n, t_n^{-1}]$ est l'anneau des polynômes de Laurent à n variables et à coefficients entiers, noté $R_{t_1, \dots, t_n}$ ou R_n .

Dans la suite de ce chapitre, on va considérer des R -modules M , où R sera un anneau de groupe $R = \mathbb{Z}G$, ce qui équivaut à demander que M soit un groupe abélien (i.e. un $\mathbb{Z}$ -module) muni d'une action $\mathbb{Z}$ -linéaire de G .

Définition 5.15. Soit M un R -module. Une *présentation finie* de M est une suite exacte de R -modules

$$R^c \xrightarrow{A} R^l \rightarrow M \rightarrow 0,$$

où R^c et R^l sont munis de bases canoniques et $A \in M_{l,c}(R)$ (la *matrice de présentation* de M). On a alors notamment $M \cong R^l / AR^c$.

Exemple 5.16. Le R -module $M = 0 = R/R$ est présenté par la matrice (1).

Exemple 5.17. Le R -module $M = R = R/0.R$ est présenté par la matrice (0).

Exemple 5.18. Le groupe abélien $M = \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ est présenté par la matrice (n).

Exemple 5.19. Le R_t -module $M = \mathbb{Z} = R_t/(t-1)R_t$ est présenté par la matrice ($t-1$).

Exemple 5.20. L'idéal non principal $M = \langle t_1 - 1, t_2 - 1 \rangle_{R_{t_1, t_2}}$ admet la matrice de présentation $A = \begin{pmatrix} t_1 - 1 \\ t_2 - 1 \end{pmatrix}$. En effet, le morphisme

$$(R_{t_1, t_2})^2 / (A \cdot R_{t_1, t_2}) \rightarrow R_{t_1, t_2}, \quad [(P(t_1, t_2), Q(t_1, t_2))] \mapsto (t_2 - 1)P - (t_1 - 1)Q$$

est bien injectif, et d'image l'idéal M .

Remarque 5.21. Quitte à rajouter des colonnes nulles à une matrice de présentation, on peut supposer que $c \geq l$.

Proposition 5.22. Deux matrices A, B à coefficients dans R présentent des R -modules isomorphes si et seulement si A et B sont reliées par un nombre fini des opérations suivantes :

(1) Permutation des lignes ou des colonnes,

(2) $A \leftrightarrow \begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$

(3) Ajout ou retrait d'une **colonne** de zéros,

(4) Ajout à une ligne (resp. colonne) un scalaire fois une autre ligne (resp. colonne).

Remarquons que la multiplication d'une ligne ou d'une colonne par un inversible de R est une conséquence des 4 opérations précédentes. Cette dernière opération est parfois mentionnée dans la littérature dans l'énoncé de cette proposition.

Définition 5.23. Pour $r \in \mathbb{N}$, le r -ème idéal élémentaire d'un R -module M (de matrice de présentation $A \in M_{l,c}(R)$) est

$$\mathcal{E}_r(M) := \langle (l - r + 1) - \text{mineurs de } A \rangle_R \subset R.$$

En particulier

$$\begin{aligned} 0 &= \mathcal{E}_0(M) \\ &\subset \mathcal{E}_1(M) = \langle \text{mineurs maximaux de } A \rangle_R \\ &\subset \dots \\ &\subset \mathcal{E}_l(M) = \langle \text{coefficients de } A \rangle_R \\ &\subset \mathcal{E}_{l+1}(M) = R. \end{aligned}$$

Si M admet une matrice de présentation A carrée, on appelle *ordre de M* le déterminant

$$\text{ord}(M) := \det(A) \in R$$

(défini aux inversibles de R^* près). En particulier dans ce cas $\mathcal{E}_1(M) = \det(A) \cdot R$.

Exemple 5.24. Pour $R = \mathbb{Z}$, $A = (n)$ (avec $n \in \mathbb{N}$) et $M = \langle a \mid na = 0 \rangle \cong (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, +)$, on a $\text{ord}(M) = n$, donc l'ordre de M en tant que R -module coïncide avec l'ordre de M au sens classique de la théorie des groupes fini (c'est-à-dire le cardinal de M).

5.5. Définition G.

Définition 5.25. Soit G un groupe. Le *commutateur* de deux éléments $g, h \in G$ est $[g, h] := ghg^{-1}h^{-1}$. Le *groupe des commutateurs* G' (ou *groupe dérivé*) du groupe G est le sous-groupe de G engendré par les commutateurs (c'est un sous-groupe normal de G). L'*abélianisation* de G est le quotient $\alpha_G : G \twoheadrightarrow G/G' =: G^{ab}$, vers l'*abélianisé* G^{ab} .

Pour K un nœud, l'abélianisation $\alpha_K = \alpha_{G_K}$ est le morphisme de *Hurewicz* :

$$\alpha_K : G_K = \pi_1(E_K) \twoheadrightarrow H_1(E_K) = G_K^{ab} \cong \mathbb{Z}.$$

Proposition 5.26. L'action de G sur G' par conjugaison induit une action de G/G' sur G'/G'' , et donc une structure de $\mathbb{Z}[G/G']$ -module sur G'/G'' .

Ainsi, si K est un nœud, son groupe $G = G_K$ vérifie $\mathbb{Z}[G/G'] \cong \mathbb{Z}[t^{\pm 1}]$.

Définition 5.27 (Définition G). Soit K un nœud. Le polynôme d'Alexander $\Delta_K(t)$ est l'ordre de G'_K/G''_K vu comme un $\mathbb{Z}[G_K/G'_K]$ -module (donc défini à $\doteq$ près).

Cette définition est une des plus "naturelles", ou "intrinsèques" au nœud K .

Exemple 5.28. Pour $K = U$, $G_K = \mathbb{Z}$, donc $G'_K = G''_K = \{1\}$, donc G'/G'' est le module nul, présenté par (1). D'où $\Delta_U(t) \doteq \det(1) = 1$.

Théorème 5.29. (Lien Définition S - Définition G) Soit K un nœud, et V une matrice de Seifert de K . Alors $tV - V^T$ est une matrice de présentation de G'_K/G''_K en tant que $\mathbb{Z}[t^{\pm 1}]$ -module.

On va voir en partie pourquoi dans le chapitre suivant, en passant par les **revêtements**.

6. MODULES D'ALEXANDER

6.1. Revêtements et groupes. Soit X un CW-complexe de point base $p \in X$. On rappelle que

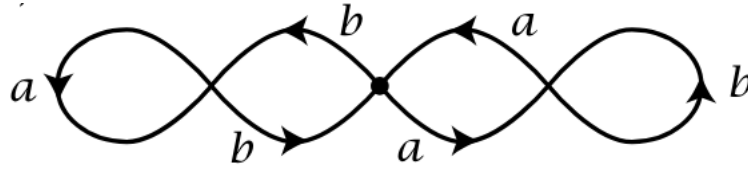
- $G = \pi_1(X, p) = \{\gamma: [0, 1] \rightarrow X, \gamma(0) = \gamma(1) = p\}/\text{homotopie}$.
- $\widetilde{X} = \{c: [0, 1] \rightarrow X, c(0) = p\}/\text{homotopie}$ est le *revêtement universel* de X .
- $G \curvearrowright \widetilde{X}$ par $[\gamma] \cdot [c] := [\gamma c]$.

On rappelle également que pour X de groupe fondamental G , il y a bijection entre

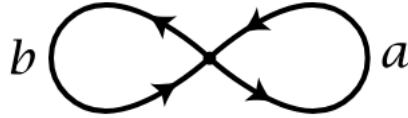
- les suites exactes $1 \rightarrow H \rightarrow G \rightarrow G/H \rightarrow 1$,
- les revêtements *réguliers* $X^H \rightarrow X$ (i.e. ceux tels que $\pi_1(X^H)$ est un sous-groupe normal de $\pi_1(X)$),

avec $X^H = \widetilde{X}/H$ et $H = \pi_1(X^H)$.

Exemple 6.1. (tiré de [Ha, Page 58]) Le revêtement triple suivant



du bouquet de deux cercles ci-après



est un revêtement irrégulier. Le groupe fondamental en bas est $\mathbb{F}_2 = \langle a, b \rangle$, et celui en haut est son sous-groupe $\langle a^2, aba, b^2, bab \rangle_{\mathbb{F}_2} \cong \mathbb{F}_4$, qui est bien d'indice trois mais pas distingué. Remarquons que la seule transformation de deck du revêtement est l'identité.

6.2. Module d'Alexander d'un nœud. Soit K nœud de $\mathbb{S}^3$, E son extérieur, et G son groupe.

Définition 6.2. Le *revêtement infini cyclique* $\hat{E}$ de E est le revêtement régulier associé à la suite exacte

$$1 \rightarrow G' \rightarrow G \rightarrow G/G' \cong \mathbb{Z} \rightarrow 1$$

Ici $G/G' \cong t^{\mathbb{Z}}$ agit sur $\hat{E}$, donc $R_t = \mathbb{Z}[t^{\mathbb{Z}}]$ agit sur le complexe de chaînes cellulaires $C_*(\hat{E}, \mathbb{Z})$ et sur l'homologie $H_*(\hat{E}, \mathbb{Z})$.

Définition 6.3. Le *module d'Alexander* de K est $\mathcal{A}_K := H_1(\hat{E}_K, \mathbb{Z})$ vu comme R_t -module.

Exemple 6.4. Pour $K = U$, on a $E \cong \mathbb{S}^1 \times D^2$ et $G \cong \mathbb{Z}$. Ici le revêtement infini cyclique coïncide avec le revêtement universel : $\hat{E} = \tilde{E} \cong \mathbb{R} \times D^2$, qui est contractible, donc

$$\mathcal{A}_U = H_1(\hat{E}_U, \mathbb{Z}) = 0.$$

Proposition 6.5. Pour tout nœud K , $\mathcal{A}_K$ a une matrice de présentation carrée. (On verra plus loin qu'une telle matrice est $tV - V^T$ avec V matrice de Seifert de K).

Définition 6.6 (Définition C). Soit K un nœud. Le polynôme d'Alexander $\Delta_K(t)$ (défini à $\pm$ près) est égal à l'ordre du module d'Alexander de K :

$$\Delta_K(t) = \text{ord}(\mathcal{A}_K).$$

Exemple 6.7. Pour $K = U$, on a $\mathcal{A}_U = 0 = R_t/(1)R_t$, donc (1) est une matrice de présentation de $\mathcal{A}_U$ et

$$\Delta_U(t) = \text{ord}(\mathcal{A}_U) = \det((1)) = 1.$$

6.3. Le revêtement infini cyclique via une surface de Seifert. Soit K un nœud et Σ une surface de Seifert de K . Notons $S = \Sigma \cap E$. Remarquons que Σ se rétracte par déformation sur S , et que le bord de S est $\partial S = l_K$ une longitude préférée de K .

On prend un voisinage tubulaire de S

$$\nu S \cong S \times [-1, 1],$$

avec $S \cong S \times \{0\}$. On note $S^+ := S \times \{1\}$ et $S^- := S \times \{-1\}$. Le bord de νS est égal à l'union de S^+ , de S^- et du cylindre $\partial S \times [-1, 1]$.

Définissons maintenant $F := E \setminus \nu S$, c'est-à-dire l'extérieur du nœud "tranché au niveau de la surface de Seifert". Le bord ∂F de F contient notamment S^+ et S_- . Remarquons qu'en recollant S^+ à S^- (de manière intuitive), on retrouve E :

$$F / (S^- \stackrel{id_S}{\sim} S^+) \cong E.$$

Proposition 6.8. *Le revêtement infini cyclique $\hat{E}$ de E est obtenu en recollant une infinité de copies de F notées $F^{(n)}$ (indexées par $n \in \mathbb{Z}$), où l'on recolle $S^{+, (n)}$ à $S^{-, (n+1)}$:*

$$\hat{E} \cong \left(\sqcup_{n \in \mathbb{Z}} F^{(n)} \right) / (S^{+, (n)} \stackrel{id_S}{\sim} S^{-, (n+1)}).$$

Théorème 6.9 ([BZ], Theorem 8.14). *Soit K un nœud de $\mathbb{S}^3$ et V une matrice de Seifert de K . Alors $tV - V^T$ est une matrice de présentation du $\mathbb{Z}[t^{\pm}]$ -module $\mathcal{A}_K = H_1(\hat{E}_K, \mathbb{Z})$.*

En conséquence, les invariants de nœuds définis dans la Définition C et dans la Définition S coïncident.

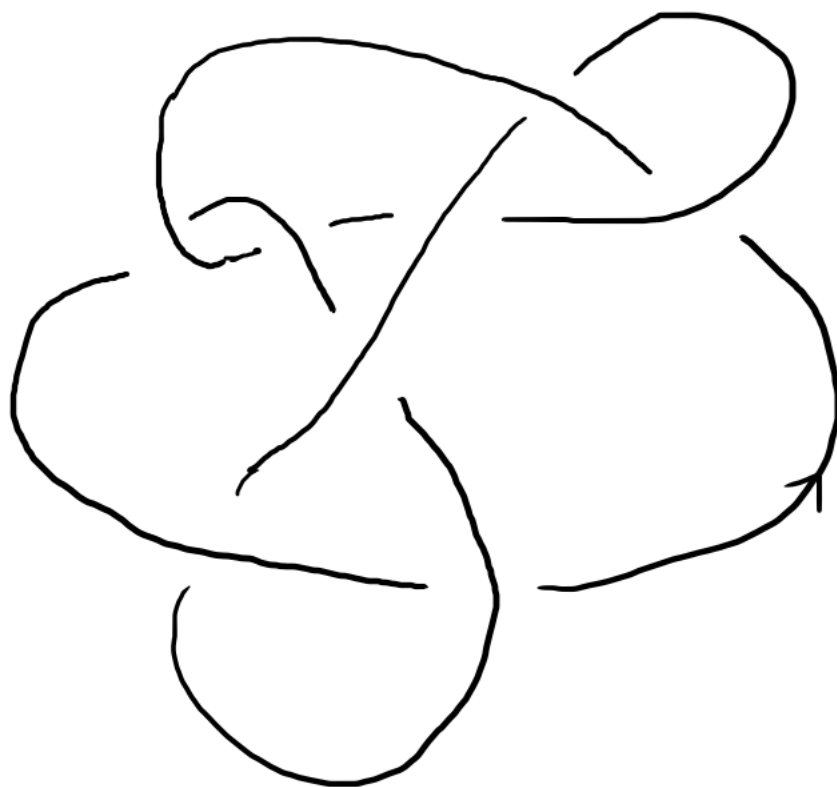
Démonstration. On utilise la Proposition 6.8 et la suite exacte longue de Mayer-Vietoris en décomposant $\hat{E}_K$ en $\sqcup_{n \text{ pair}} F^{(n)}$ et $\sqcup_{n \text{ impair}} F^{(n)}$. Une preuve détaillée se trouve dans [BZ, Theorem 8.14]. $\square$

Remarque 6.10. Via la correspondance entre les revêtements réguliers de E et les sous-groupes distingués de $\pi_1(E)$, la Définition C du polynôme d'Alexander peut s'interpréter purement en terme de théorie des groupes, dans la Définition G.

Exercice. (Exercice 6.A) Soit $J = 3_1 \# 3_1^*$



et K le nœud dessiné ci-après.



On va montrer que le module d'Alexander distingue J et K contrairement au polynôme d'Alexander.

- (1) Retrouver le nom de K dans les tables de nœuds, et expliquer comment faire.
- (2) Montrer que $\Delta_K(t) = (1 - t + t^2)^2 = \Delta_J(t)$.
- (3) Montrer que $\mathcal{A}_K = R_t/(1-t+t^2)^2 R_t$ et que $\mathcal{A}_J = R_t/(1-t+t^2) R_t \oplus R_t/(1-t+t^2) R_t$.
- (4) Quels autres invariants aurait-on pu utiliser pour distinguer J et K ?

6.4. Cas des entrelacs, cas univarié. Soit $L = L_1 \cup \dots \cup L_\mu$, $E = E_L$, $G = G_L = \pi_1(E_L)$, et l'abélianisation $\alpha_L : G \twoheadrightarrow G/G' \cong \mathbb{Z}^\mu$.

Définition 6.11. L'augmentation $\epsilon : \mathbb{Z}^\mu \rightarrow \mathbb{Z}$ est le morphisme envoyant chaque vecteur de la base canonique de $\mathbb{Z}^\mu$ sur $1 \in \mathbb{Z}$.

Du point de vue multiplicatif, on écrit $\epsilon : t_1^{\mathbb{Z}} \dots t_\mu^{\mathbb{Z}} \rightarrow t^{\mathbb{Z}}$, $t_i \mapsto t$.

Définition 6.12. Soit L un entrelacs. Soit $\hat{E}_L^{\mathbb{Z}}$ le revêtement infini cyclique de E_L associé à la suite exacte courte

$$1 \rightarrow \text{Ker}(\epsilon \circ \alpha_L) \rightarrow G \xrightarrow{\epsilon \circ \alpha_L} \mathbb{Z} \rightarrow 1.$$

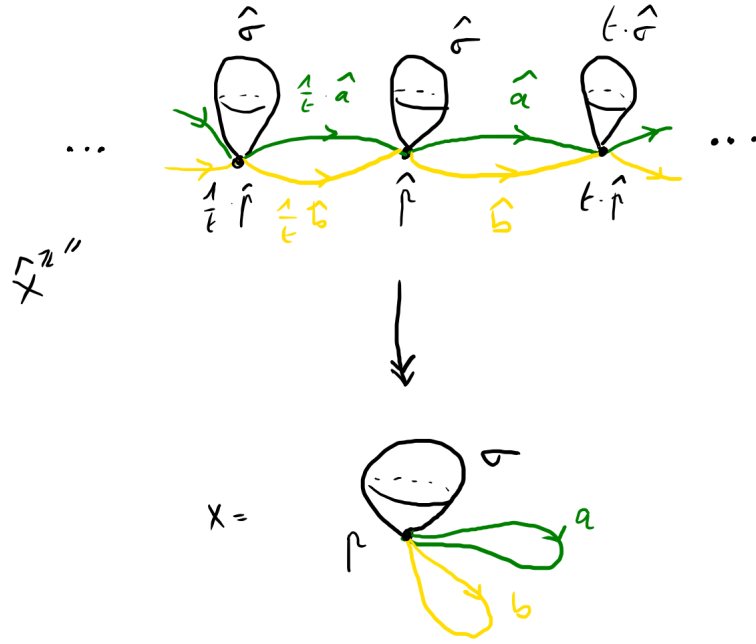
Le module d'Alexander univarié de L est $\mathcal{A}_L^{\mathbb{Z}} := H_1(\hat{E}_L^{\mathbb{Z}}, \mathbb{Z})$ vu comme R_t -module.

Définition 6.13 (Définition C, cas univarié pour entrelacs). Soit L un entrelacs. Alors $\Delta_L(t)$ est l'ordre de $\mathcal{A}_L^{\mathbb{Z}}$, i.e. le pgcd des éléments de l'idéal élémentaire $\mathcal{E}_1(\mathcal{A}_L^{\mathbb{Z}})$.

Remarque 6.14. On a encore le fait que $tV - V^T$ présente le module $\mathcal{A}_L^{\mathbb{Z}}$ pour toute matrice de Seifert V de l'entrelacs L .

Exemple 6.15. Pour $L = H$ l'entrelacs de Hopf (non orienté), on a $E_L \cong \mathbb{S}^1 \times \mathbb{S}^1 \times [0, 1]$. Un raisonnement topologique minutieux à l'aide d'une surface de Seifert de L nous permet de voir que $\hat{E}_L^{\mathbb{Z}} \cong \mathbb{S}^1 \times [0, 1] \times \mathbb{R}$, donc $\mathcal{A}_L^{\mathbb{Z}} = \mathbb{Z} = R_t/(t-1)R_t$ et $\Delta_H(t) \doteq t-1$.

Exercice. (*Exercice 6.B*) Soit $L = U \sqcup U$. Montrer que E_L est homotopiquement équivalent à un bouquet de deux cercles et d'une sphère $\mathbb{S}^2$.



Via une décomposition cellulaire du bouquet $X = \mathbb{S}^1 \vee \mathbb{S}^1 \vee \mathbb{S}^2$ en un point p , deux 1-cellules a, b et une 2-cellule σ , on trouve une structure cellulaire sur $\hat{X}^{\mathbb{Z}}$, et le calcul de l'homologie cellulaire nous donne $H_1(\hat{X}^{\mathbb{Z}}) = R_t(\hat{a} - \hat{b}) \cong R_t$, donc $\Delta_{U \sqcup U}(t) = \text{ord}(\mathcal{A}_{U \sqcup U}^{\mathbb{Z}}) = \text{ord}(H_1(\hat{X}^{\mathbb{Z}})) = 0$.

6.5. Cas des entrelacs, cas multivarié.

Définition 6.16. Soit L un entrelacs. Soit $\hat{E}_L^{\mu}$ le revêtement maximal abélien de E_L associé à la suite exacte courte

$$1 \rightarrow G' \rightarrow G \xrightarrow{\alpha_L} G/G' \cong \mathbb{Z}^{\mu} \rightarrow 1.$$

Soit X un CW-complexe de dimension 2 ayant une seule 0-cellule et homotopiquement équivalent à E_L (un tel X existe car E_L est un extérieur d'entrelacs). Soit $\hat{X}^{\mu}$ le revêtement maximal abélien de X muni de la structure de CW-complexe induite, et $\hat{X}^{\mu,0}$ le 0-squelette correspondant.

Le module d'Alexander multivarié de L est $\mathcal{A}_L^{\mu} := H_1(\hat{X}^{\mu}, \hat{X}^{\mu,0}, \mathbb{Z})$ vu comme R_{μ} -module. (On rappelle que $R_{\mu} = \mathbb{Z}[t_1^{\pm}, \dots, t_{\mu}^{\pm}]$).

Remarque 6.17 ([BZ], Section 9). En étudiant la suite exacte longue en homologie associée à la paire $(\hat{X}^{\mu}, \hat{X}^{\mu,0})$, on trouve la suite exacte courte

$$0 \rightarrow H_1(\hat{X}^{\mu}) \rightarrow H_1(\hat{X}^{\mu}, \hat{X}^{\mu,0}) \rightarrow \langle t_1 - 1, \dots, t_{\mu} - 1 \rangle_{R_{\mu}} \rightarrow 0,$$

où l'idéal $\langle t_1 - 1, \dots, t_{\mu} - 1 \rangle_{R_{\mu}}$ est le noyau du morphisme d'anneaux $R_{\mu} \rightarrow \mathbb{Z}$, $t_i \mapsto 1$. Cette suite exacte courte ne scinde pas en général.

Dans le cas des nœuds ou du module univarié d'un entrelacs, le terme de droite de la suite exacte précédente devient $(t - 1)R_t$, et la suite scinde. Ainsi, on peut identifier $H_1(\hat{X}^{\mathbb{Z}}) \cong H_1(\hat{E}_L^{\mathbb{Z}})$ comme un sous-module canonique de $H_1(\hat{X}^{\mathbb{Z}}, \hat{X}^{\mathbb{Z},0})$, et il est donc plus logique de définir ce module plus simple comme le *module d'Alexander*.

Cette différence de définitions et de propriétés entre les cas univarié et multivarié expliquera des légères différences d'un terme $(t - 1)$ dans certaines formules à venir.

Définition 6.18 (Définition C, cas multivarié pour entrelacs). Soit L un entrelacs. Alors le premier idéal élémentaire de son module d'Alexander multivarié vérifie

$$\mathcal{E}_1(\mathcal{A}_L^{\mu}) = \langle t_1 - 1, \dots, t_{\mu} - 1 \rangle_{R_{\mu}} \cdot I,$$

où I est un idéal principal de R_{μ} .

Le *polynôme d'Alexander multivarié de L* $\Delta_L(t_1, \dots, t_\mu)$ est défini comme un générateur de l'idéal I précédent, ou de manière équivalente comme le pgcd des éléments de $\mathcal{E}_1(\mathcal{A}_L^\mu)$. C'est un invariant de L , défini à multiplication par un inversible de R_μ près, i.e. par un élément de $\pm t_1^{\mathbb{Z}} \dots t_\mu^{\mathbb{Z}}$ (on notera encore $\doteq$ cette relation d'équivalence).

On verra au chapitre suivant comment obtenir des matrices de présentation du module d'Alexander multivarié (et donc comment calculer son premier idéal élémentaire), à l'aide du *calcul de Fox*.

Exemple 6.19. Pour $L = H$ l'entrelacs de Hopf, le revêtement maximal abélien est le revêtement universel : $\hat{E}_L^2 = \widetilde{E}_L = \mathbb{R}^2 \times [0, 1]$.

On a $E_L \cong X = \mathbb{S}^1 \times \mathbb{S}^1$, le tore muni de la structure cellulaire classique à un point p , deux cercles et une 2-cellule. Ainsi le revêtement maximal abélien est $E_L^2 = \mathbb{R}^2$, et son 0-squelette est $E_L^{2,0} = \mathbb{Z}^2 = t_1^{\mathbb{Z}} t_2^{\mathbb{Z}} \cdot \hat{p}$.

Comme $H_1(\hat{X}^2) = 0$, la suite exacte courte de la Remarque 6.17 implique que $\mathcal{A}_L^2 \cong \langle t_1 - 1, t_2 - 1 \rangle$. Or on peut vérifier que $\langle t_1 - 1, t_2 - 1 \rangle$ admet la matrice de présentation $\begin{pmatrix} t_2 - 1 \\ t_1 - 1 \end{pmatrix}$, cf Exemple 5.20. Donc $\Delta_L(t_1, t_2) = \text{pgcd}(t_2 - 1, 1 - t_2) = 1$.

Exemple 6.20. Pour $L = U \sqcup U$, on se ramène à $X = \mathbb{S}^1 \vee \mathbb{S}^1 \vee \mathbb{S}^2$ comme précédemment, et en étudiant l'homologie cellulaire de $\hat{X}^2$ on trouve que $\mathcal{A}_L^2 = (R_2)^2$, de matrice de présentation $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$, et donc $\Delta_L(t_1, t_2) = 0$.

Proposition 6.21. *Soit L un entrelacs. On a la relation :*

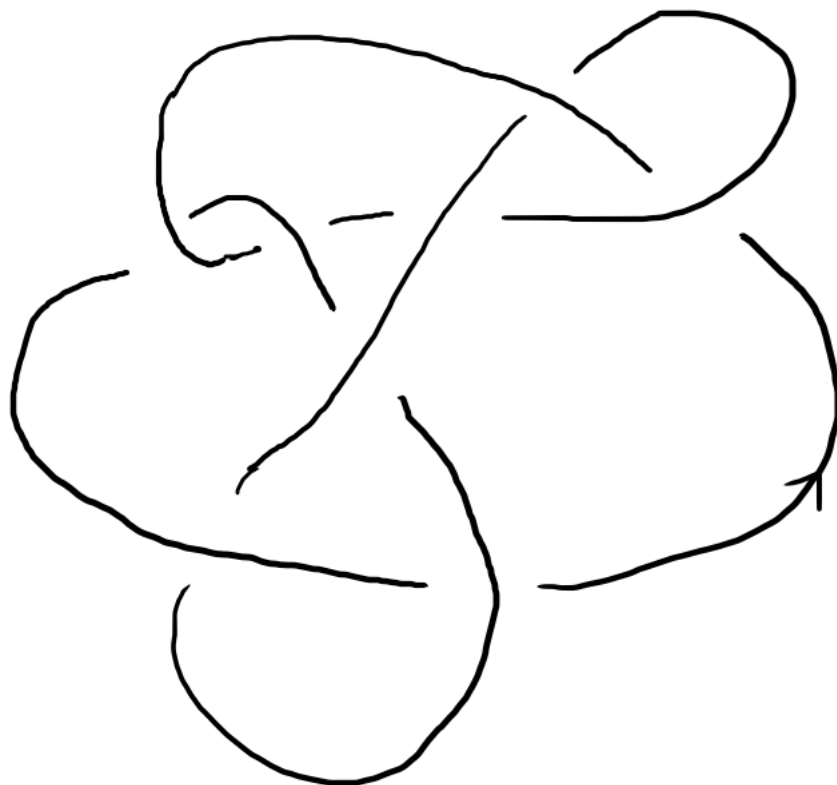
$$\Delta_L(t) \doteq (t - 1) \cdot \Delta_L(t, \dots, t).$$

6.6. Exercices Séance 6 (20 mars 2026) : Revêtements, modules d'Alexander et Définitions C.

Exercice 6.A. Soit $J = 3_1 \# 3_1^*$



et K le nœud dessiné ci-après.



On va montrer que le module d'Alexander distingue J et K contrairement au polynôme d'Alexander.

- (1) Retrouver le nom de K dans les tables de nœuds, et expliquer comment faire.
- (2) Montrer que $\Delta_K(t) = (1 - t + t^2)^2 = \Delta_J(t)$.
- (3) Montrer que $\mathcal{A}_K = R_t / (1 - t + t^2)^2 R_t$ et que $\mathcal{A}_J = R_t / (1 - t + t^2) R_t \oplus R_t / (1 - t + t^2) R_t$.
- (4) Quels autres invariants aurait-on pu utiliser pour distinguer J et K ?

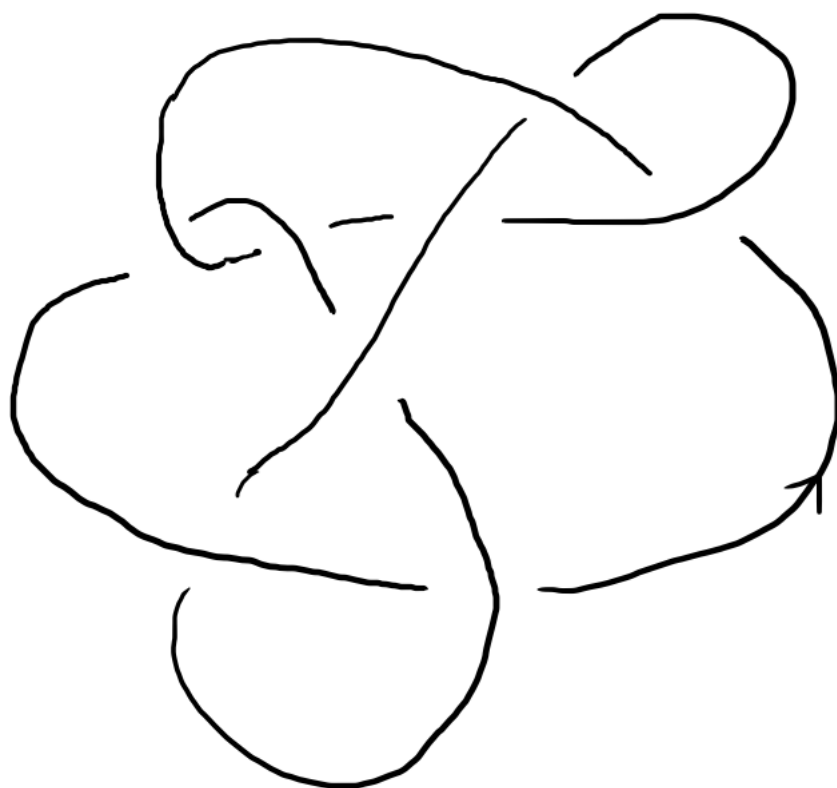
Exercice 6.B. Soit $L = U \sqcup U$. Montrer que E_L est homotopiquement équivalent à un bouquet de deux cercles et d'une sphère $\mathbb{S}^2$.

6.7. Solutions des exercices.

(Exercice 6.A) Soit $J = 3_1 \sharp 3_1^*$



et K le nœud dessiné ci-après.



On va montrer que le module d'Alexander distingue J et K contrairement au polynôme d'Alexander.

(1) Retrouver le nom de K dans les tables de nœuds, et expliquer comment faire.

(2) Montrer que $\Delta_K(t) = (1 - t + t^2)^2 = \Delta_J(t)$.

(3) Montrer que $\mathcal{A}_K = R_t / (1 - t + t^2)^2 R_t$ et que $\mathcal{A}_J = R_t / (1 - t + t^2) R_t \oplus R_t / (1 - t + t^2) R_t$.

(4) Quels autres invariants aurait-on pu utiliser pour distinguer J et K ?

(1) En utilisant *Knot identification tool* (<http://joshuahhh.com/projects/kit/>), on trouve que K est soit 8_{20} soit une somme connexe de deux trèfles.

Ensuite, en allant consulter les tables comme sur le site *Knotinfo*, on peut reconnaître K dans le diagramme de 8_{20} . Donc $K = 8_{20}$.

Remarquons que le site *Knot identification tool* est également pratique pour voir ce qu'il se passe quand on modifie certains croisements de K . Cela sera utile pour la question (4).

(2) Comme on aura besoin de calculer les modules d'Alexander au (3), passer par des matrices de Seifert et la Définition S semble pertinent.

Pour J , on utilise simplement la valeur déjà connue de $\Delta_{3_1}(t) = \Delta_{3_1^*}(t) = 1 - t + t^2$ et la multiplicativité par somme connexe.

Pour K , on construit une surface d'algorithme, et après un peu de travail on trouve une matrice de Seifert V_K , par exemple

$$V_K = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

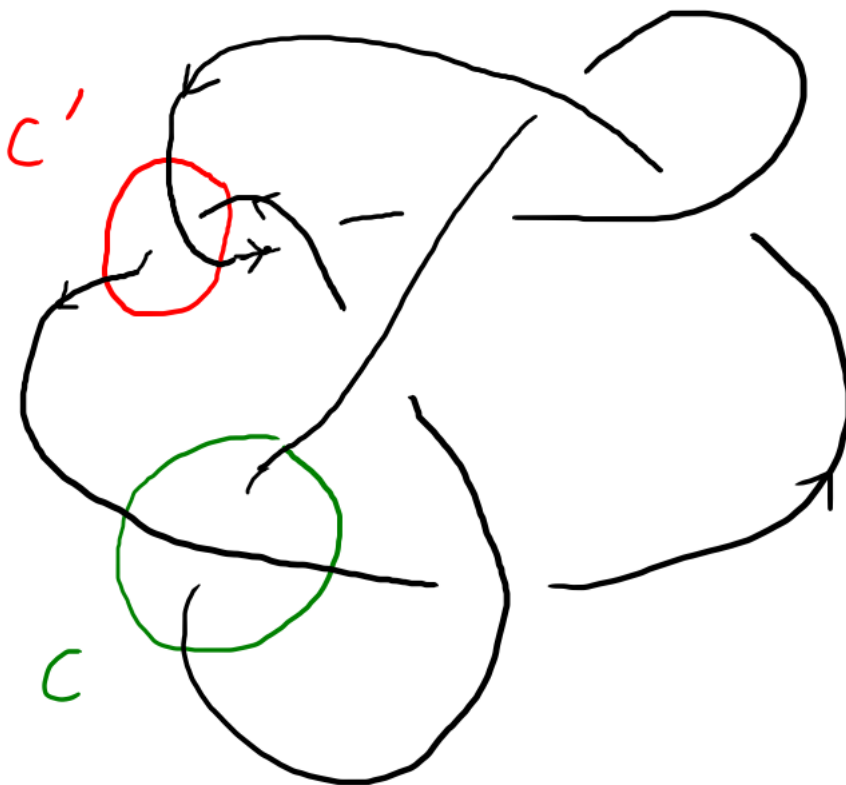
On trouve ensuite le résultat en calculant $\det(tV_K - V_K^T)$.

(3) On montre que via les opérations de la Proposition 5.22, la matrice $tV_K - V_K^T$ est équivalente à la matrice $((1 - t + t^2)^2)$. D'où $\mathcal{A}_K = R_t / (1 - t + t^2)^2 R_t$.

Pour J , son caractère composé permet d'exhiber une matrice de Seifert V_J qui s'écrit comme une somme directe, puis de démontrer que $tV_J - V_J^T$ est équivalente à $\begin{pmatrix} 1 - t + t^2 & 0 \\ 0 & 1 - t + t^2 \end{pmatrix}$.

D'où le résultat.

(4) Dans le diagramme de K , distinguons deux croisements spécifiques c et c' , voir ci-après :



Si on change le signe de c , on peut vérifier que l'on obtient un diagramme de U . Donc $u(K) = 1$. Or $u(J) = 2$, comme somme connexe de deux nœuds de nombre de dénouement 1, par la Proposition 2.13 (2) et la Proposition 2.14 (2). Ainsi J et K sont distingués par u .

D'autre part, remplacer le croisement c' par celui de signe inverse donne un diagramme de J , et le remplacer par un lissage (comme dans un triplet skein) donne un diagramme de $U \sqcup U$. Avec le triplet skein $(K, J, U \sqcup U)$, on a donc la relation des polynômes de

Jones :

$$\frac{1}{t}J_J(t) - tJ_K(t) = (t^{1/2} - t^{-1/2})J_{U \sqcup U}(t) = \frac{1}{t} - t.$$

Par l'égalité précédente, si J et K avaient même polynôme de Jones, alors ce polynôme serait égal à 1. Or on sait que

$$J_J(t) = J_{3_1}(t)J_{3_1^*}(t) = (t + t^3 - t^4)(t^{-1} + t^{-3} - t^{-4}) \neq 1.$$

Donc J et K sont distingués par le polynôme de Jones.

(Exercice 6.B) Soit $L = U \sqcup U$. Montrer que E_L est homotopiquement équivalent à un bouquet de deux cercles et d'une sphère $\mathbb{S}^2$.

Notons $L = U_1 \sqcup U_2$. On isotope L pour que U_1 soit une droite verticale passant par ∞ , ce qui fait que son extérieur est un tore solide V_1 horizontal (représenté en noir dans la figure de gauche ci-après)). On isotope U_2 pour qu'il soit inclus dans un disque méridien de V_1 . Alors $E_L = V_1 \setminus \nu U_2$. Le bord de νU_2 est représenté en rouge dans la figure de gauche ci-après.



On partage l'âme de V_1 en deux chemins, en jaune et vert sur la figure de gauche. On peut maintenant rétracter par déformation E_L sur l'union d'une sphère (en noir sur la figure de droite), du chemin jaune et du chemin vert. Enfin, on peut faire une équivalence d'homotopie pour faire glisser l'un des bouts du chemin jaune sur l'autre, pour en faire un cercle jaune. On procède de même avec le chemin vert. Finalement, on a bien un bouquet d'une sphère (noire) et de deux cercles (jaune et vert).

RÉFÉRENCES

- [Al] J. W. Alexander, *Topological invariants of knots and links*, Transactions of the American Mathematical Society, Volume 30, 1928, p. 275–306.
- [BH] M. Brittenham & S. Hermiller, *Unknotting number is not additive under connected sum*, arxiv preprint 2506.24088, 2025.
- [BZ] G. Burde and H. Zieschang, *Knots*, volume 5 of *de Gruyter Studies in Mathematics*, Walter de Gruyter & Co., Berlin, 1985.
- [Cro] P. R. Cromwell, *Knots and links*, Cambridge University Press, Cambridge, 2004. xviii+328 pp.
- [Ha] A. Hatcher, *Algebraic topology*, Cambridge : Cambridge University Press (2002; Zbl 1044.55001).
- [La] L. Lascaud, *Une définition du polynôme d’Alexander par les diagrammes en grille pour les entrelacs*, 2025, Mémoire de Master 2 Mathématiques fondamentales, Université Paris-Cité et Sorbonne-Université.
- [Li] W. B. R. Lickorish, *An introduction to knot theory*, volume 175 of *Graduate Texts in Mathematics*. Springer-Verlag, New York, 1997.
- [Lo] E. Long, *Topological invariants of knots : three routes to the Alexander Polynomial*, <https://www.ucl.ac.uk/~ucbpeal/alexandermac.pdf>
- [OSS15] Ozsváth, P. S., Stipsicz, A. I., & Szabó, Z. (2015). *Grid homology for knots and links* (Vol. 208). American Mathematical Soc.
- [Po] M. Polyak, *Minimal generating sets of Reidemeister moves*, Quantum Topol. 1 (2010), no. 4, 399–411.
- [Scha] M. Scharlemann, *Unknotting Number One Knots Are Prime*, Invent. Math. 82, 37–55, 1985.
- [Sch] J. Schubert, *S-equivalence of Seifert matrices*.
- [Su] P. Suwara, *Minimal generating sets of directed oriented Reidemeister moves*, J. Knot Theory Ramifications 26 (2017), no. 4, 1750016, 20 pp.