

Introduction à la théorie de l'homotopie

Notes de cours

Najib IDRISI

Université de Paris & Institut de Mathématiques de Jussieu–Paris Rive Gauche

Dernière mise à jour : 13 septembre 2019

Préface

Ce document donne un résumé rapide du contenu abordé dans le cours *Introduction à la théorie de l'homotopie* donné à l'Université de Paris en 2019–2020 dans le cadre du M2 Mathématiques Fondamentales. Elles ne sont pas complètes et le contenu peut encore changer ou être réorganisé. Pour plus d'informations, se référer à <https://idrissi.eu/fr/cours/1920-homotopie/>.

Ces notes sont fortement inspirées par des notes de cours de Grégory Ginot [Gin19].
Lectures à envisager :

- Rappels de topologie algébrique et d'algèbres homologiques : [Bre93 ; Hat02 ; Sai17 ; Sch15 ; Spa95 ; Wei94].
- Catégories de modèles : [DS95 ; Hov99].
- Ensembles simpliciaux : [GJ99 ; Fri08].
- Théorie de l'homotopie rationnelle : [FHT01 ; Hes07 ; FOT08].
- Quasi-catégories : [Lur09].

Contact : najib.idrissi-kaitouni@imj-prg.fr

Table des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Catégories de modèles | 7 |
| 1.1 | Motivation | 7 |
| 1.1.1 | Espaces topologiques | 7 |
| 1.1.2 | Complexes de chaînes | 9 |
| 1.2 | Axiomatique | 11 |
| 1.2.1 | (Co)fibrations | 11 |
| 1.2.2 | Définition | 13 |
| 2 | Catégorie homotopique | 17 |
| 2.1 | Localisation | 17 |
| 2.2 | Homotopies | 18 |
| 2.2.1 | À gauche | 18 |
| 2.2.2 | À droite | 21 |
| 2.3 | Catégorie homotopique | 22 |
| 3 | Engendrement cofibrant | 25 |
| 3.1 | Complexes de chaînes \mathbb{N} -gradués | 25 |
| 3.1.1 | L'axiome (MC5) | 27 |
| 3.2 | Catégories de modèles cofibrement engendrées | 30 |
| 4 | Adjonctions de Quillen | 35 |
| 4.1 | Foncteurs dérivés | 35 |
| 4.2 | Limites et colimites homotopiques | 40 |
| 5 | Ensembles simpliciaux | 45 |
| 5.1 | Notions de base | 45 |
| 5.1.1 | Définition et propriétés | 45 |
| 5.1.2 | Adjonction avec les espaces topologiques | 47 |
| 5.2 | Structure de modèle | 48 |
| 5.3 | Équivalence avec Top | 51 |
| 5.3.1 | Enrichissement | 51 |
| 5.3.2 | Groupes d'homotopie simpliciaux | 54 |
| 5.3.3 | Fin de la preuve | 57 |
| 5.4 | Correspondance de Dold–Kan | 58 |
| 6 | Homotopie rationnelle | 61 |
| 6.1 | Localisation de Bousfield | 62 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 6.2 | Algèbres différentielles graduées commutatives | 63 |
| 6.2.1 | Définitions | 63 |
| 6.2.2 | Transfert de la structure de catégorie de modèles | 67 |
| 6.2.3 | Théorie de Sullivan | 69 |
| 6.3 | Comparaison entre CDGA et homotopie rationnelle | 72 |
| 6.3.1 | L'adjonction | 72 |
| 6.3.2 | L'équivalence | 76 |
| 6.4 | Applications | 79 |
| 6.4.1 | Modèles | 79 |
| 6.4.2 | Formalité | 80 |
| 6.4.3 | Fibrations et modèles | 81 |
| 6.4.4 | Type d'homotopie réel | 83 |
| 6.5 | Modèles de Quillen | 84 |
| 7 | Infini-catégories | 91 |
| 7.1 | Quasi-catégories | 93 |
| 7.1.1 | Nerf d'une catégorie | 93 |
| 7.1.2 | Définition des quasi-catégories | 97 |
| 7.2 | Structure de modèles de Joyal | 98 |
| 7.3 | Catégories simpliciales | 98 |
| 7.4 | Quasi-catégorie associée à une catégorie de modèles | 98 |

1 Catégories de modèles

1.1 Motivation

1.1.1 Espaces topologiques

Notons Top la catégorie des espaces topologiques.

Définition 1.1.1. Deux fonctions $f : X \rightarrow Y$ sont *homotopes*, noté $f \simeq g$, si $\exists H : X \times [0, 1] \rightarrow Y$ telle que $H(-, 0) = f$ and $H(-, 1) = g$. On note $[X, Y]$ l'ensemble des classes d'homotopies de fonctions $X \rightarrow Y$.

Définition 1.1.2. Deux espaces sont *homotopiquement équivalents* (aussi noté $X \simeq Y$) si $\exists f : X \rightarrow Y : g$ telle que $f \circ g \simeq \text{id}_Y$ et $g \circ f \simeq \text{id}_X$. Les applications f et g sont alors appelées des *équivalences d'homotopie*.

Cela définit une « relation d'équivalence » sur les espaces topologiques. La théorie de l'homotopie est l'étude des espaces « à homotopie près », c'est-à-dire qu'on considère que deux espaces sont « les mêmes » s'ils sont homotopiquement équivalents.

La Question : étant donnés X, Y , comment tester si $X \simeq Y$? En général, on utilise des *invariants homotopiques*.

Définition 1.1.3. Un *espace pointé* est une paire (X, x_0) où X est un espace et $x_0 \in X$. Une *application pointée* est une application qui préserve le point base. On note Top_* la catégorie des espaces topologiques pointés.

Définition 1.1.4. une *homotopie pointée* est une homotopie qui reste constante sur le point base. On note $[(X, x_0), (Y, y_0)]$ l'ensemble des classes d'homotopies pointées de fonctions pointées $(X, x_0) \rightarrow (Y, y_0)$.

Définition 1.1.5. Pour un espace X , on note $\pi_0(X)$ l'ensemble des composantes connexes de X . Soit (X, x_0) un espace pointé. On définit $\pi_n(X, x_0) = [(S^n, *), (X, x_0)]$.

On définit ainsi des foncteurs $\pi_0 : \text{Top} \rightarrow \text{Set}$ et $\pi_n : \text{Top}_* \rightarrow \text{Set}$. De plus, π_1 est un groupe, et π_n est un groupe abélien pour $n \geq 2$.

Proposition 1.1.6. Soit $f : X \rightarrow Y$ une équivalence d'homotopie. Alors $\pi_0(f)$ est une bijection, et pour tout $x \in X$, $\pi_n(X, x) \rightarrow \pi_n(Y, f(x))$ est un isomorphisme de groupes.

Définition 1.1.7. Une *équivalence d'homotopie faible* est une application qui vérifie la conclusion de la proposition précédente. On note $\xrightarrow{\sim}$ les équivalences d'homotopie faibles.

Exemple 1.1.8. Une équivalence d'homotopie est une équivalence d'homotopie faible, mais la réciproque est fausse : $\mathbb{N} \rightarrow \{0\} \cup \{1/n \mid n > 0\}$ est une équivalence d'homotopie faible mais n'est pas une équivalence d'homotopie.

Définition 1.1.9. Deux espaces X, Y sont dits *faiblement équivalents* s'il existe un zigzag :

$$X \xleftarrow{\sim} X_1 \xrightarrow{\sim} \dots \xleftarrow{\sim} X_n \xrightarrow{\sim} Y.$$

Proposition 1.1.10. Deux espaces faiblement équivalents ont les mêmes groupes d'homotopie.

La réciproque est fausse : par exemple \mathbf{RP}^2 et \mathbf{RP}^∞ ont les mêmes groupes d'homotopie, mais ils ne sont pas faiblement équivalents (car sinon ils auraient la même homologie).

Rappel : un CW-complexe X est un espace topologique obtenu de la façon suivante : on démarre d'un espace discret X_0 , puis on obtient X_1 à partir de X_0 en recollant des cellules de dimension 1, etc.

Théorème 1.1.11 (Whitehead). Si $f : X \rightarrow Y$ est une équivalence d'homotopie faible entre deux CW-complexes, alors c'est une équivalence d'homotopie.

Théorème 1.1.12. Soit X un espace quelconque. Alors il existe un CW-complexe Z et une équivalence d'homotopie faible $Z \xrightarrow{\sim} X$.

On a donc deux cadres différents pour la théorie de l'homotopie :

- la catégorie homotopique « forte », où l'on inverse formellement les équivalences d'homotopie ;
- la catégorie homotopique « faible », où l'on inverse formellement les équivalences d'homotopie faible.

Dans le premier cas, on est plus proche de ce que l'on a envie d'étudier, mais c'est plus difficile à tester algébriquement ; dans le deuxième cas, c'est plus faible, mais c'est plus simple à tester algébriquement. Le théorème de Whitehead nous dit que si l'on se restreint aux CW-complexes, les deux notions sont les mêmes.

Dans ce cours, l'objectif est de généraliser ce cadre à une catégorie quelconque :

- on voudra définir ce que cela signifie pour deux objets d'être « les mêmes à homotopie près » ;
- qu'est-ce qu'une homotopie, et une équivalence d'homotopie forte ;
- quels sont les objets « gentils » (modèles) sur lesquels on peut se contenter de ne regarder les choses qu'à homotopie faible près.

Autre problème que nous allons résoudre : les limites et colimites dans Top ne préservent pas les équivalences faibles. Par exemple :

$$\begin{array}{ccccc} * & \longleftarrow & S^0 & \longrightarrow & * \\ \downarrow \sim & & \downarrow \sim & & \downarrow \sim \\ [0,1] & \longleftarrow & S^0 & \longrightarrow & [0,1] \end{array}$$

La colimite du diagramme en haut est $*$, celle de celui du bas est S^1 . On verra que celui du dessous est meilleur : les applications qui le composent sont des inclusions de sous-espaces.

1.1.2 Complexes de chaînes

Voici un autre exemple de cadre où l'on peut faire de l'algèbre homotopique. Soit R un anneau commutatif.

Définition 1.1.13. Un *complexe de chaînes* est un diagramme de R -modules :

$$\dots \xrightarrow{d} C_i \xrightarrow{d} C_{i-1} \xrightarrow{d} \dots$$

vérifiant $d \circ d = 0$. Un morphisme est un morphisme de diagrammes. On note $\text{Ch}(R)$ la catégorie des complexes de chaînes. On note aussi $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$ la sous-catégorie des complexes de chaînes C vérifiant $C_i = 0$ pour $i < 0$.

Définition 1.1.14. Deux morphismes $f, g : C \rightarrow D$ sont *homotopes* (noté $f \simeq g$) si il existe une suite d'applications $h : C_n \rightarrow D_{n+1}$ telles que $f - g = hd + dh$.

Définition 1.1.15. Une *équivalence d'homotopie* est une paire d'applications $f : C \rightleftarrows D : g$ telles que $f \circ g \simeq \text{id}_D$ et $g \circ f \simeq \text{id}_C$.

Proposition 1.1.16. Une *équivalence d'homotopie* induit un isomorphisme en homologie.

Définition 1.1.17. Un *quasi-isomorphisme* est un morphisme de complexes de chaînes qui induit un isomorphisme en homologie. Deux complexes de chaînes C, D sont dits *quasi-isomorphes* s'il existe un zigzag de quasi-isomorphismes :

$$C = X_0 \xleftarrow{\sim} X_1 \xrightarrow{\sim} X_2 \xleftarrow{\sim} \dots \xrightarrow{\sim} X_n = D.$$

Exemple 1.1.18. Un quasi-isomorphisme n'est pas forcément une équivalence d'homotopie ! Considérer par exemple :

$$\begin{array}{ccccccc} \dots & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & \mathbb{Z} & \xrightarrow{\cdot 2} & \mathbb{Z} & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & \dots \\ & & & & \downarrow & & \downarrow & & & & \\ \dots & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & \dots \end{array}$$

On peut donc étudier les complexes de chaînes à équivalence homotopique près, ou bien à quasi-isomorphismes près. Qui sont les complexes « gentils » pour lesquels c'est la même chose ?

Définition 1.1.19. On dit qu'un R -module P est *projectif* si pour toute surjection $p : A \rightarrow B$ et pour toute application $f : P \rightarrow B$, il existe un relèvement $g : P \rightarrow A$ tel que $p \circ g = f$.

Exemple 1.1.20. Pour $R = \mathbb{Z}$, les R -modules projectifs (de type fini) sont les modules libres \mathbb{Z}^n .

Définition 1.1.21. On dit qu'un R -module I est *injectif* si pour toute injection $i : A \rightarrow B$ et pour toute application $f : A \rightarrow I$, il existe une extension $g : B \rightarrow I$ telle que $g \circ i = f$.

Exemple 1.1.22. Pour $R = \mathbb{Z}$, les R -modules injectifs sont les groupes abéliens divisibles.

Proposition 1.1.23. Soit $f : C \rightarrow D$ un quasi-isomorphisme de complexes de chaînes.

- Si C est projectif en tout degré, alors f est une équivalence d'homotopie.
- Si D est injectif en tout degré, alors f est une équivalence d'homotopie.

On aura donc trois cadres possibles pour la théorie de l'homotopie dans les complexes de chaînes :

- Le cadre « fort », où l'on travaille à équivalence d'homotopie près et tous les objets sont « gentils ».
- Le cadre « projectif », où l'on travaille à quasi-isomorphisme près, les modules « gentils à la source » sont les complexes projectifs et tous les modules sont « gentils au but ». Vous avez vu en cours d'algèbre homologique que tous les R -modules M ont une résolution projective $P_* \rightarrow M$, qui jouent le rôle d'un CW-complexe dans ce cadre.
- Le cadre « injectif », où l'on travaille à quasi-isomorphisme près, tous les modules sont « gentils à la source » et les modules « gentils au but » sont les modules injectifs. Vous avez aussi vu que tout module M a une résolution injective $M \rightarrow I_*$, qui jouent un rôle dual aux CW-complexes dans ce cadre.

On va également voir comment résoudre les problèmes apparaissent quand certains foncteurs ne préservent pas les quasi-isomorphismes. Vous avez vu que c'était le cas du foncteur \otimes , et la version correcte d'un point de vue homotopique était le foncteur Tor (qui fait intervenir une résolution projective, c.-à-d. qu'on se place dans le premier cadre), ainsi que du foncteur Hom dont la version correcte est Ext (qui fait soit intervenir une résolution projective de la source, auquel cas on se place dans le premier cadre, soit une résolution injective du but, auquel cas on se place dans le deuxième cadre).

1.2 Axiomatique

On a vu précédemment que dans les complexes de chaînes, ce qui importait d'un point de vue homotopique était de savoir si les applications étaient injectives/surjectives et de savoir si on pouvait « relever » une application le long d'une injection/surjection. Nous allons rapidement rappeler l'analogue des injections et surjections dans la catégorie des espaces topologiques, leurs propriétés abstraites, et s'en servir comme base pour définir la notion de catégorie de modèles.

1.2.1 (Co)fibrations

Définition 1.2.1. Une *fibration (de Hurewicz)* est une application continue $p : E \rightarrow B$ telle que pour tout espace X et toutes les applications \tilde{H}_0 et H dans le diagramme suivant, on peut trouver un relèvement \tilde{H} :

$$\begin{array}{ccc} X \times \{0\} & \xrightarrow{\tilde{f}} & E \\ \downarrow \sim & \nearrow \tilde{H} & \downarrow p \\ X \times [0, 1] & \xrightarrow{H} & B \end{array}$$

Concrètement, cela signifie que si l'on a une homotopie $H : X \times I \rightarrow B$ entre $f, g : X \rightarrow B$ et une application $\tilde{f} : X \rightarrow E$ qui relève f (c.à.d. que $p \circ \tilde{f} = f$) alors on peut trouver une homotopie \tilde{H} qui relève H (et donc $\tilde{g} = \tilde{H}(-, 1)$ qui relève g).

Définition 1.2.2. Une *fibration de Serre* est une application $p : E \rightarrow B$ qui vérifie la propriété de relèvement précédente pour $X = [0, 1]^n$ (pour tout $n \geq 0$).

Une fibration (de Hurewicz) est une fibration de Serre ; la réciproque est fausse.¹

Exemple 1.2.3. Un revêtement est une fibration de Serre. Une projection $p : F \times B \rightarrow B$ est une fibration. Plus généralement, un espace fibré est une fibration de Serre ; si la base est paracompacte², alors c'est une fibration de Hurewicz.

Proposition 1.2.4. Le tiré en arrière d'une fibration (de Serre ou de Hurewicz) est une fibration (de Serre ou de Hurewicz).

Exemple 1.2.5. Soit $f : X \rightarrow Y$ une application continue. On définit son *espace des chemins* :

$$P_f = Y^{[0,1]} \times_Y X = \{(\gamma, x) \in Y^{[0,1]} \times X \mid \gamma(0) = f(x)\}$$

Alors $\text{ev}_1 : P_f \rightarrow Y$, $\text{ev}_1(\gamma, x) = \gamma(1)$ est une fibration de Hurewicz. On note que f se factorise comme $X \xrightarrow{\sim} P_f \xrightarrow{\text{ev}_1} Y$: cela permet de « remplacer » n'importe quelle application par une équivalence suivie d'une fibration.

1. P.ex. le « revêtement universel » – construit de la manière habituelle – de la boucle d'oreille hawaïenne.

2. Séparé + tout recouvrement ouvert admet un raffinement localement fini.

Proposition 1.2.6. Soit $p : E \rightarrow B$ une fibration. Si B est connexe par arcs, alors tous les espaces $E_b = p^{-1}(b)$ sont homotopiquement équivalents.

On note en général F la fibre de p . La proposition suivante dit grosso modo que les fibrations sont les « suites exactes courtes » dans les espaces topologiques :

Proposition 1.2.7. Soit $p : E \rightarrow B$ une fibration de Serre et supposons que B est connexe par arcs. Soit $b_0 \in B$ un point, $F = p^{-1}(b_0)$ la fibre au-dessus de b_0 , et $f_0 \in F$ un point. Alors on a une suite exacte longue :

$$\dots \rightarrow \pi_n(F, f_0) \rightarrow \pi_n(E, f_0) \rightarrow \pi_n(B, b_0) \rightarrow \pi_{n-1}(F, f_0) \rightarrow \dots$$

Remarque 1.2.8. Cela généralise la suite exacte longue en homologie associée à une suite exacte courte de complexes de chaînes. En effet, pour une application linéaire surjective $p : X \rightarrow Y$, les « fibres » $p^{-1}(Y)$ sont toutes isomorphes au noyau.

Les fibrations sont intéressantes quand on regarde ce qui se passe « à droite » dans le foncteur $\text{Hom}(-, -)$. Regardons maintenant le cas dual, les cofibrations, qui sont intéressantes « à gauche ».

Définition 1.2.9. Une *cofibration* (de Hurewicz) est une application continue $i : A \rightarrow X$ telle que pour tout espace Y et toutes les applications f, h dans le diagramme suivant, le relèvement H existe :

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{h} & Y^{[0,1]} \\ \downarrow i & \nearrow H & \downarrow ev_0 \\ X & \xrightarrow{f} & Y \end{array}$$

Concrètement, cela signifie que si l'on a une application $f : X \rightarrow Y$ est une homotopie entre la « restriction » $f \circ i = f|_A$ et une autre application $A \rightarrow Y$, alors on peut étendre cette homotopie à X .

Proposition 1.2.10. Soit $i : A \rightarrow X$ une cofibration. Alors c'est un homéomorphisme sur son image, qui est fermée si X est séparé.

Proposition 1.2.11. Une inclusion $i : A \subset X$ est une cofibration si et seulement si $X \times [0, 1]$ se rétracte sur $X \times \{0\} \cup A \times [0, 1]$.

Exemple 1.2.12. L'inclusion d'un sous-complexe cellulaire est une cofibration. (En fait toutes les cofibrations sont des rétracts de telles inclusions.)

Exemple 1.2.13. Soit $f : A \rightarrow X$ une application. On définit son **cylindre** :

$$\text{Cyl}_f = (A \times [0, 1] \sqcup X) / (a, 0) \sim f(a).$$

Alors $A \hookrightarrow \text{Cyl}_f, a \mapsto (a, 1)$ est une cofibration. De plus f se factorise en $A \hookrightarrow \text{Cyl}_f \xrightarrow{\sim} X$. Cela permet de « remplacer » toute application par une cofibration à équivalence près.

Remarque 1.2.14. Soit $\gamma : A \sqcup A \rightarrow A$ l'application évidente. Soit $f, g : A \rightarrow X$ deux applications. Une homotopie entre f et g est exactement la donnée d'une application $H : \text{Cyl}_\gamma \rightarrow X$ telle que la composée $A \sqcup A \rightarrow \text{Cyl}_\gamma \rightarrow X$ est donnée par (f, g) .

Remarque 1.2.15. Ce dernier énoncé se dualise mais c'est légèrement plus compliqué. Soit $f, g : A \rightarrow X$ deux fonctions. Soit $\delta : X \rightarrow X \times X$ la diagonale et considérons l'espace des chemins P_δ . Alors une fonction $H : X \rightarrow P_\delta$ vérifiant $\text{ev}_0 \circ H = f$ et $\text{ev}_1 \circ H = g$ est équivalente à la donnée d'une troisième fonction $u : A \rightarrow X$ et de deux homotopies $f \simeq u$ et $u \simeq g$.

Proposition 1.2.16. Soit (X, A) une paire d'espaces topologiques, alors on a une suite exacte longue :

$$\dots \pi_n(A) \rightarrow \pi_n(X) \rightarrow \pi_n(X, A) \rightarrow \pi_{n-1}(A) \rightarrow \dots$$

Proposition 1.2.17. Si $i : A \rightarrow X$ est une cofibration, que A est r -connexe et X est s -connexe, alors $\pi_n(X, A) \cong \pi_n(X/A)$ pour $n \leq r + s$ et $\pi_{r+s+1}(X, A) \rightarrow \pi_{r+s+1}(X/A)$ est surjective.

1.2.2 Définition

Remarque 1.2.18. Pour nous, dans une catégorie, les morphismes entre deux objets fixés forment un ensemble.

Définition 1.2.19. Un morphisme $f : A \rightarrow B$ est un rétract de $g : X \rightarrow Y$ s'il existe un diagramme commutatif :

$$\begin{array}{ccccc} & & \text{id}_A & & \\ & \nearrow & & \searrow & \\ A & \xrightarrow{i} & X & \xrightarrow{r} & A \\ \downarrow f & & \downarrow g & & \downarrow f \\ B & \xrightarrow{i'} & Y & \xrightarrow{r'} & B \\ & \searrow & & \nearrow & \\ & & \text{id}_B & & \end{array}$$

Définition 1.2.20 (Quillen [Qui67]). Une catégorie de modèles³ est une catégorie \mathcal{C} munie de trois classes de morphismes :

| Classe | Nom des éléments | Notation |
|---------------|----------------------|----------------------|
| \mathcal{W} | Équivalences faibles | $\xrightarrow{\sim}$ |
| \mathcal{C} | Cofibrations | \hookrightarrow |
| \mathcal{F} | Fibrations | \twoheadrightarrow |

et qui vérifient les axiomes suivants :

(MC1) \mathcal{C} est complète et cocomplète ;

3. Quillen les appelait les catégories de modèles fermées.

- (MC2) « 2 parmi 3 » : Soit f et g deux morphismes composables, si deux morphismes parmi f, g et $g \circ f$ sont dans \mathcal{W} , alors le troisième aussi ;
- (MC3) Si f est un rétract de g et que $g \in \mathcal{W}$ (resp. \mathcal{F}, \mathcal{C}) alors $f \in \mathcal{W}$ (resp. \mathcal{F}, \mathcal{C}) ;
- (MC4) Considérons le diagramme commutatif formé par les flèches pleines :

$$\begin{array}{ccc} A & \longrightarrow & X \\ \downarrow i & \nearrow & \downarrow p \\ B & \longrightarrow & Y \end{array}$$

Alors :

- (i) Si $i \in \mathcal{C}$ et $p \in \mathcal{F} \cap \mathcal{W}$ alors la flèche en pointillés existe ;
 - (ii) Si $i \in \mathcal{C} \cap \mathcal{W}$ et $p \in \mathcal{F}$ alors la flèche en pointillés existe ;
- (MC5) Tout morphisme $f : X \rightarrow Y$ admet deux factorisations, fonctorielles en f :

$$X \hookrightarrow P_f \twoheadrightarrow Y \qquad X \hookrightarrow C_f \twoheadrightarrow Y$$

Définition 1.2.21. Les éléments de $\mathcal{C} \cap \mathcal{W}$ sont appelés les cofibrations acycliques, ceux de $\mathcal{F} \cap \mathcal{W}$ les fibrations acycliques.⁴

Définition 1.2.22. Dans le diagramme de (MC4), si la flèche en pointillés existe toujours, on dit que i a la *propriété de relèvement à gauche* (LLP) par rapport à p et que p a la *propriété de relèvement à droite* (RLP) par rapport à i . On note parfois $i \perp p$.

Remarque 1.2.23. Grâce à (MC1), la catégorie \mathcal{C} admet un objet initial \emptyset (la colimite vide) et un objet final $*$ (la limite vide).

Définition 1.2.24. Un objet $X \in \mathcal{C}$ est dit *cofibrant* si $\emptyset \rightarrow X$ est une cofibration, et *fibrant* si $X \rightarrow *$ est une fibration.

Remarque 1.2.25. Tout objet admet des remplacements fibrants et cofibrants fonctoriels par (MC5) :

$$\emptyset \hookrightarrow Q(X) \twoheadrightarrow X \qquad Y \hookrightarrow R(Y) \twoheadrightarrow *$$

Exemple 1.2.26. Soit \mathcal{C} une catégorie quelconque. Alors pour $\mathcal{W} = \{\text{isomorphismes}\}$ et $\mathcal{C} = \mathcal{F} = \mathcal{C}$ on obtient une catégorie de modèles. On peut également choisir $(\mathcal{W}, \mathcal{C}, \mathcal{F}) = (\text{isos}, \mathcal{C}, \text{isos})$ ou le dual.

Exemple 1.2.27. Soit $(\mathcal{C}, \mathcal{W}, \mathcal{C}, \mathcal{F})$ une catégorie de modèles.

⁴ On trouve parfois « cofibrations triviales » et « fibrations triviales » mais il vaut mieux éviter car ça fait penser aux fibrés triviaux, c.à.d. les produits.

- Le produit de \mathcal{C} avec une autre catégorie de modèles admet une structure de catégorie de modèles évidente.
- $(\mathcal{C}^{\text{op}}, \mathcal{W}^{\text{op}}, \mathcal{F}^{\text{op}}, \mathcal{C}^{\text{op}})$ est une catégorie de modèles.

Proposition 1.2.28. Soit $(\mathcal{C}, \mathcal{W}, \mathcal{C}, \mathcal{F})$ une catégorie de modèles.

- i est une cofibration \iff elle satisfait la LLP par rapport à toutes les fibrations acycliques.
- i est une cofibration acyclique \iff elle satisfait la LLP par rapport à toutes les fibrations.
- p est une fibration \iff elle satisfait la RLP par rapport à toutes les cofibrations acycliques.
- i est une fibration acyclique \iff elle satisfait la RLP par rapport à toutes les cofibrations.
- f est une équivalence faible \iff elle se factorise en $p \circ i$ où p est une fibration acyclique et i est une fibration acyclique.

Corollaire 1.2.29. – La donnée de deux des classes \mathcal{W} , \mathcal{C} et \mathcal{F} détermine la troisième.

- Les classes \mathcal{W} , \mathcal{C} et \mathcal{F} sont stables par composition.
- Les classes \mathcal{C} et $\mathcal{C} \cap \mathcal{W}$ sont stables par poussés en avant, les classes \mathcal{F} et $\mathcal{F} \cap \mathcal{W}$ sont stables par tirés en arrière.
- Les isomorphismes appartiennent aux trois classes \mathcal{W} , \mathcal{C} et \mathcal{F} .

Démonstration de la Proposition 1.2.28. Les quatre premiers points se démontrent de façon presque identique. Démontrons le premier. La partie \implies découle de (MC4). Maintenant soit $i : A \rightarrow B$ une application qui a la LLP par rapport à toutes les fibrations acycliques. Par (MC5), on peut factoriser i en $A \hookrightarrow X \twoheadrightarrow B$. Grâce à la LLP de i , on peut trouver h qui fait commuter le diagramme :

$$\begin{array}{ccc} A & \hookrightarrow & X \\ \downarrow i & \nearrow h & \downarrow \sim \\ B & \xlongequal{\quad} & B \end{array}$$

Alors on voit que i est un rétract de $A \hookrightarrow X$ et on conclut par (MC3) :

$$\begin{array}{ccccc} A & \xlongequal{\quad} & A & \xlongequal{\quad} & A \\ \downarrow i & & \downarrow & & \downarrow i \\ B & \xrightarrow{h} & X & \twoheadrightarrow & B \\ & \searrow & \text{id}_B & \nearrow & \\ & & & & \end{array}$$

Pour le cinquième point, on utilise (MC2) dans les deux cas. □

Démonstration du Corollaire 1.2.29. – Clair grâce à la proposition.

1 Catégories de modèles

- Le fait que \mathcal{W} est stable par composition découle de (MC2). Montrons par exemple que \mathcal{C} est stable par composition. Soit $A \xrightarrow{i} B \xrightarrow{j} C$ deux cofibrations. Montrons que $j \circ i$ a la LLP par rapport aux fibrations acycliques. On trouve des relèvements dans le diagramme suivant en deux étapes (d'abord l puis l') :

$$\begin{array}{ccc}
 A & \longrightarrow & X \\
 \downarrow i & \nearrow l & \downarrow \sim \\
 B & & \\
 \downarrow j & \nearrow l' & \\
 C & \longrightarrow & Y
 \end{array}$$

- Pour la stabilité par pushouts et pullbacks, la preuve est similaire (faire les diagrammes s'il y a le temps).
- Il est clair qu'un isomorphisme a la LLP et la RLP par rapport à n'importe quelle application. \square

On ne démontrera pas les exemples suivants tout de suite.

Exemple 1.2.30 (Quillen). Top a une structure de catégorie de modèles où les équivalences faibles sont les équivalences faibles d'homotopie, les fibrations sont les fibrations de Serre, et les cofibrations sont les rétracts d'inclusions cellulaires généralisées.⁵ Tous les objets sont fibrants, les objets cofibrants sont les rétracts de CW-complexes généralisés.

Exemple 1.2.31 (Strøm). Top a une autre structure de catégorie de modèles où les équivalences faibles sont les équivalences d'homotopie, les cofibrations sont les rétracts de cofibrations de Hurewicz d'image fermée, et les fibrations sont les fibrations de Hurewicz. Tout objet est fibrant et cofibrant

Exemple 1.2.32. Les catégories $\text{Ch}(R)$ et $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$ ont plusieurs structures de catégories de modèles :

- la structure *projective* $\mathcal{W} = \{\text{quasi.isos}\}$, $\mathcal{C} = \{\text{injections de conoyau projectif}\}$, $\mathcal{F} = \{\text{surjections}\}$ ⁶ ;
- la structure *injective* $\mathcal{W} = \{\text{quasi.isos}\}$, $\mathcal{C} = \{\text{injections}\}$ ⁷, $\mathcal{F} = \{\text{surjections de noyau injectif}\}$;
- une troisième structure « à la Strøm » : $\mathcal{W} = \{\text{éqv. d'homotopies}\}$, $\mathcal{C} = \text{LLP}(B^I \xrightarrow{ev_0} B)$, $\mathcal{F} = \text{RLP}(A \xrightarrow{i_0} A \otimes I)$.⁸

5. C'est-à-dire les applications $i : A \rightarrow B$ où $B = \text{colim } B_n$, $B_0 = A$, et B_{n+1} est obtenue à partir de B_n en recollant des cellules.

6. En degré ≥ 1 pour $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$.

7. En degré ≥ 1 pour $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$.

8. Ici, $I = N_*(\Delta^1)$.

2 Catégorie homotopique

2.1 Localisation

Soit C une catégorie et \mathcal{W} une classe de morphismes.

Définition 2.1.1. Une *localisation* de C par rapport à \mathcal{W} est une catégorie $C[\mathcal{W}^{-1}]$ munie d'un foncteur $\lambda : C \rightarrow C[\mathcal{W}^{-1}]$ satisfaisant la propriété universelle suivante : pour tout foncteur $F : C \rightarrow D$, si F envoie les morphismes de \mathcal{W} sur des isomorphismes, alors il existe un unique (à isomorphisme naturel près) foncteur $G : C[\mathcal{W}^{-1}] \rightarrow D$ tel que $G \circ \lambda = F$.

Proposition 2.1.2. La localisation $C[\mathcal{W}^{-1}]$ existe et est unique à équivalence près. On la note aussi $\text{Ho}(C)$ si \mathcal{W}^{-1} est implicite.

Remarque 2.1.3. Cette proposition n'est qu'approximativement vraie. En effet, dans la preuve qui suit, les morphismes entre deux objets ne forment pas nécessairement un ensemble ! On verra plus tard que dans une catégorie de modèles, les morphismes dans la catégorie homotopique forment toujours un ensemble.

Remarque 2.1.4. En particulier, les morphismes de \mathcal{W} sont envoyés sur des isomorphismes dans $C[\mathcal{W}^{-1}]$. La réciproque est en général fausse, mais on verra que c'est vrai pour les catégories de modèles.

Démonstration. Décrivons explicitement la catégorie $\text{Ho}(C)$. Ses objets sont les mêmes que ceux de C . Les morphismes de $\text{Ho}(C)$ sont donnés par le quotient

$$\text{Hom}_{\text{Ho}(C)}(X, Y) = \text{Path}_{\mathcal{W}}(X, Y) / \sim,$$

où :

- $\text{Path}_{\mathcal{W}}(X, Y)$ est la classe des « chemins » entre X et Y et formés par des morphismes de C et des morphismes de \mathcal{W} dans le sens inverse ;
- la relation \sim est engendrée par $X \xrightarrow{f} Y \xleftarrow{f} X \sim X$ et $X \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{g} Z \sim X \xrightarrow{g \circ f} Z$.

La composition est donnée par la concaténation des chemins. On vérifie que cela forme une catégorie et que $C \rightarrow C[\mathcal{W}^{-1}]$ (qui envoie les morphismes sur les chemins de longueur 1) est un foncteur qui vérifie la propriété universelle. \square

Le problème avec cette construction (outre le problème de théorie des ensembles) est qu'il est très difficile de faire des calculs. Par exemple, déterminer si deux morphismes sont égaux dans $\text{Ho}(C)$ est un problème non-trivial.

Définition 2.1.5. Soit $(C, \mathcal{W}, C, \mathcal{F})$ une catégorie de modèles. On définit sa *catégorie homotopique* $\mathrm{Ho}(C) = C[\mathcal{W}^{-1}]$.

Remarque 2.1.6. Cela ne dépend évidemment que de la classe \mathcal{W} , pas de C et \mathcal{F} .

2.2 Homotopies

On va maintenant montrer que $\mathrm{Hom}_{\mathrm{Ho}(C)}(A, X)$ forme un ensemble que l'on peut décrire comme un quotient d'un ensemble de morphismes dans C par une relation d'homotopie. Il faut noter qu'il y a deux notions duales d'homotopie, une à gauche (pour la source) et une à droite (pour le but).

2.2.1 À gauche

Définition 2.2.1. Un *cylindre* de $A \in C$ est une factorisation

$$A \sqcup A \hookrightarrow C \xrightarrow{\sim} A$$

de l'application canonique $A \sqcup A \rightarrow A$. On note $i_0, i_1 : A \rightarrow C$ les deux composantes de la cofibration.

Définition 2.2.2. Soit $f, g : A \rightarrow X$ deux morphismes. Une *homotopie à gauche* entre f et g est la donnée d'un cylindre $A \sqcup A \xrightarrow{(i_0, i_1)} C \xrightarrow{\sim} A$ et d'une application $H : C \rightarrow X$ telle que $H \circ i_0 = f$ et $H \circ i_1 = g$. Si H existe, on note $f \stackrel{l}{\simeq} g$.

Exemple 2.2.3. Dans Top avec la structure de Quillen, on peut par exemple choisir $C = A \times [0, 1]$. Une homotopie à gauche est exactement ce qu'on appelle habituellement une homotopie.

Exemple 2.2.4. Dans $\mathrm{Ch}(R)$ avec la structure injective, on peut choisir $C_n = A_n \oplus A_n \oplus A_{n-1}$ avec $d(x, y, z) = (dx + (-1)^n z, dy - (-1)^n z, dz)$. Une homotopie $f \simeq g : A \rightarrow X$ est équivalente à la donnée de $h : A_{n-1} \rightarrow X_n$ telle que $dh \pm hd = f - g$ (exactement la définition habituelle).

Remarque 2.2.5. En général il n'est pas possible de choisir un cylindre une fois pour toute ; deux applications peuvent être homotopes à gauche en choisissant un certain cylindre mais sans qu'il soit possible d'en choisir un autre qu'on s'est fixé à l'avance.

Proposition 2.2.6. Si $f \stackrel{l}{\simeq} g : A \rightarrow X$ alors $h \circ f \stackrel{l}{\simeq} h \circ g : X \rightarrow Z$ pour tout morphisme $h : X \rightarrow Z$.

Démonstration. Soit $H : C \rightarrow X$ une homotopie entre f et g . Alors $h \circ H$ est une homotopie entre $h \circ f$ et $h \circ g$. \square

Lemme 2.2.7. Si $A \sqcup A \hookrightarrow C \xrightarrow{\sim} A$ est un cylindre et que A est cofibrant, alors $i_0, i_1 : A \rightarrow C$ sont des cofibrations acycliques.

Démonstration. On remarque déjà que $A \rightarrow A \sqcup A$ est une cofibration, car c'est le poussé en avant de :

$$\begin{array}{ccc} \emptyset & \hookrightarrow & A \\ \downarrow & & \downarrow \\ A & \longrightarrow & A \sqcup A \end{array}$$

Comme i_0 est la composée de deux cofibrations, c'est une cofibration. L'axiome (MC2) entraîne qu'elle est acyclique :

$$\begin{array}{ccccccc} A & \xrightarrow{\quad} & A \sqcup A & \xrightarrow{\quad} & C & \xrightarrow{\sim} & A \\ & \searrow & & \nearrow & & & \\ & & i_0 & & & & \end{array} \quad \square$$

Proposition 2.2.8. Si A est cofibrant, alors \simeq^l définit une relation d'équivalence sur $\text{Hom}_C(A, X)$.

Démonstration. Vérifions les propriétés une par une.

Réflexivité Soit $f : A \rightarrow X$ et soit $A \sqcup A \rightarrow C \xrightarrow{\sim} A$ un cylindre quelconque, obtenu p.ex par (MC5). Alors $H : C \xrightarrow{\sim} A \xrightarrow{f} X$ est une homotopie entre f et f .

Symétrie Si $f \simeq^l g$ via une homotopie $H : C \rightarrow X$, alors on définit un nouveau cylindre $A \sqcup A \cong A \sqcup A \hookrightarrow C \rightarrow A$ où le premier morphisme échange les deux facteurs. Le morphisme H' obtenu en composant H avec cet échange définit alors une homotopie entre g et f : $H' \circ i_0 = H \circ i_1 = g$ et $H' \circ i_1 = H \circ i_0 = f$.

Transitivité C'est là qu'on a besoin de l'hypothèse « A est cofibrant ». Supposons $f \simeq^l g$ et $g \simeq^l h$ via des homotopies $H : C \rightarrow X$ et $H' : C' \rightarrow X$. On construit un nouveau cylindre C'' comme un poussé en avant (faire un dessin : on recolle deux cylindres) :

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow[i_0']{\sim} & C' \\ \sim \downarrow i_1 & & \downarrow \\ C & \longrightarrow & C'' \end{array}$$

Les morphismes $C \rightarrow C''$ et $C' \rightarrow C''$ sont des cofibrations acycliques (car poussés en avant de cofibrations acycliques). La propriété universelle induit un morphisme $C'' \rightarrow A$, qui est une équivalence faible par (MC2) ($C \xrightarrow{\sim} C'' \rightarrow X$ est une équivalence faible). On vérifie que ça donne un cylindre avec (i_0, i_1') . De plus, toujours par propriété universelle, H et H' induisent $H'' : C'' \rightarrow X$ qui se restreint à f et h , c.à.d. c'est une homotopie $f \simeq^l h$.

□

Proposition 2.2.9. Soit A un objet cofibrant et $h : X \xrightarrow{\sim} Y$ une équivalence faible. Si h est une fibration (acyclique) ou si X et Y sont fibrants, alors h_* est une bijection :

$$h_* : \text{Hom}_C(A, X) / \xrightarrow{\sim} \text{Hom}_C(A, Y) / \xrightarrow{\sim} .$$

Démonstration. Grâce à la proposition précédente, $h_*(f) = h \circ f$ passe au quotient.

- Supposons que $h : X \rightarrow Y$ est une fibration acyclique. La surjectivité de h_* découle immédiatement de (MC4). Pour l'injectivité, supposons que $f, g : A \rightarrow X$ sont deux morphismes tels que $h \circ f \xrightarrow{\sim} h \circ g$. Soit $A \sqcup A \hookrightarrow C \xrightarrow{\sim} A$ un cylindre et $H : C \rightarrow Y$ une homotopie entre $h \circ f$ et $h \circ g$. On peut trouver un relèvement :

$$\begin{array}{ccc} A \sqcup A & \xrightarrow{(f,g)} & X \\ \downarrow & \nearrow K & \downarrow \sim h \\ C & \xrightarrow{H} & Y \end{array}$$

et K est une homotopie entre f et g .

- Supposons maintenant que X et Y sont fibrants. On va déduire la bijectivité du cas précédent à l'aide du « Lemme de Brown » (qu'on démontrera plus tard). On vient de démontrer que $F = \text{Hom}_C(A, -) / \xrightarrow{\sim}$ envoie les fibrations acycliques sur des bijections. Montrons qu'alors il envoie les équivalences faibles entre objets fibrants sur des bijections aussi. On peut factoriser le morphisme $(\text{id}_X, h) : X \rightarrow X \times Y$ en $X \hookrightarrow W \xrightarrow{\sim} X \times Y$. Comme X et Y sont fibrants, les morphismes $X \leftarrow X \times Y \rightarrow Y$ sont des fibrations (car tirés en arrière de fibrations). On obtient le diagramme suivant :

$$\begin{array}{ccccc} & & X & & \\ & \swarrow h & \downarrow i \sim & \searrow \text{id}_X & \\ & Y & W & X \times Y & X \\ & \swarrow p_Y & \downarrow \pi & \searrow p_X & \\ & Y & X \times Y & X & \end{array}$$

- $p_Y \circ \pi$ est une fibration acyclique par (MC2) donc $F(p_Y \circ \pi) : F(W) \rightarrow F(Y)$ est une bijection ;
- de même $F(p_X \circ \pi) : F(W) \rightarrow F(X)$ est une bijection ;
- $p_X \circ \pi \circ i$ est l'identité donc $F(p_X \circ \pi \circ i)$ est l'identité, donc en particulier une bijection ; comme $F(p_X \circ \pi)$ est une bijection, on en déduit que $F(i)$ est une bijection ;
- finalement, $F(h) = F(p_X \circ \pi) \circ F(i)$ est une bijection car composée de deux bijections. \square

Proposition 2.2.10. Si X est fibrant, $f \stackrel{l}{\simeq} g : A \rightarrow X$ et $h : B \rightarrow A$ est un morphisme, alors $f \circ h \stackrel{l}{\simeq} g \circ h$.

Démonstration. Soit $A \sqcup A \hookrightarrow C \xrightarrow{\sim} A$ un cylindre et $H : C \rightarrow X$ une homotopie entre f et g . Factorisons $C \xrightarrow{\sim} A$ comme $C \xrightarrow{\sim} C' \xrightarrow{\sim} A$ par (MC5) (et par (MC2) les deux morphismes sont des équivalences faibles). Comme X est fibrant, on peut trouver H' tel que :

$$\begin{array}{ccc} C & \xrightarrow{H} & X \\ \downarrow \sim & \nearrow H' & \downarrow \\ C' & \longrightarrow & * \end{array}$$

Alors $H' : C' \rightarrow X$ est toujours une homotopie entre f et g . L'avantage étant qu'on a un cylindre du type $A \sqcup A \hookrightarrow C' \xrightarrow{\sim} A$.

Maintenant, soit $B \sqcup B \hookrightarrow D \xrightarrow{\sim} B$ un cylindre pour B . On peut trouver un relèvement G :

$$\begin{array}{ccccc} B \sqcup B & \xrightarrow{h \sqcup h} & A \sqcup A & \hookrightarrow & C' \\ \downarrow & & & \nearrow & \downarrow \sim \\ D & \xrightarrow{\sim} & B & \xrightarrow{h} & X \end{array}$$

On vérifie alors que $H \circ G$ est une homotopie entre $f \circ h$ et $g \circ h$. □

2.2.2 À droite

On peut également tout dualiser.

Définition 2.2.11. Un *objet chemin* de $X \in \mathcal{C}$ est une factorisation

$$X \xrightarrow{\sim} P \twoheadrightarrow X \times X$$

de l'application canonique $X \rightarrow X \times X$. On note $p_0, p_1 : P \rightarrow X$ les deux composantes de la fibration.

Définition 2.2.12. Soit $f, g : A \rightarrow X$ deux morphismes. Une *homotopie à droite* entre f et g est la donnée d'un objet chemin $X \xrightarrow{\sim} P \xrightarrow{(p_0, p_1)} X \times X$ et d'une application $H : A \rightarrow P$ telle que $p_0 \circ H = f$ et $p_1 \circ H = g$. Si H existe, on note $f \stackrel{r}{\simeq} g$.

Proposition 2.2.13. Si $f \stackrel{r}{\simeq} g : A \rightarrow X$ alors $f \circ h \stackrel{l}{\simeq} g \circ h : B \rightarrow A$ pour tout morphisme $h : B \rightarrow A$.

Lemme 2.2.14. Si $X \xrightarrow{\sim} P \twoheadrightarrow X \times X$ est un objet chemin et que X est cofibrant, alors $p_0, p_1 : P \rightarrow X$ sont des fibrations acycliques.

Proposition 2.2.15. Si X est fibrant, alors $\stackrel{r}{\simeq}$ définit une relation d'équivalence sur $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(A, X)$.

Proposition 2.2.16. Soit X un objet fibrant et $h : A \xrightarrow{\sim} B$ une équivalence faible. Si h est une cofibration (acyclique) ou si A et B sont cofibrants, alors h^* est une bijection :

$$h^* : \text{Hom}_C(B, X) / \xrightarrow{r} \text{Hom}_C(A, X) / \xrightarrow{r}.$$

Proposition 2.2.17. Si A est cofibrant, $f \xrightarrow{r} g : A \rightarrow X$ et $h : X \rightarrow Y$ est un morphisme, alors $h \circ f \xrightarrow{r} h \circ g$.

2.3 Catégorie homotopique

Proposition 2.3.1. Soit $f, g : A \rightarrow X$ deux morphismes.

- Si A est cofibrant alors $f \xrightarrow{l} g \implies f \xrightarrow{r} g$.
- Si X est fibrant alors $f \xrightarrow{r} g \implies f \xrightarrow{l} g$.

Démonstration. On démontre le premier point, l'autre est dual. Supposons que $f \xrightarrow{l} g$. Soit $A \sqcup A \hookrightarrow C \xrightarrow{j} A$ un cylindre pour A et $H : C \rightarrow X$ une homotopie. On a vu que i_0 est une cofibration acyclique. Choisissons un objet chemin $X \xrightarrow{\sim} P \rightarrow X \times X$ quelconque pour X . On peut trouver un relèvement :

$$\begin{array}{ccccc} A & \xrightarrow{f} & X & \xrightarrow{\sim} & P \\ \sim \downarrow i_0 & & \searrow K & & \downarrow \\ C & \xrightarrow{(fj, H)} & & & X \times X \end{array}$$

Alors $Ki_1 : A \rightarrow P$ est une homotopie à droite entre f et g . □

Définition 2.3.2. Soit A un objet cofibrant et X un objet fibrant. On note $[A, X]$ le quotient de $\text{Hom}_C(A, X)$ par la relation d'équivalence de la proposition précédente.

Définition 2.3.3. La catégorie πC_{cf} a pour objets les objets fibrants et cofibrants de C , et pour morphismes entre A et X on prend $[A, X]$.

Théorème 2.3.4 (Analogie du théorème de Whitehead). Soit $f : A \rightarrow X$ un morphisme entre deux objets fibrants et cofibrants. Alors f est une équivalence faible si et seulement si il existe $g : X \rightarrow A$ tel que $f \circ g$ et $g \circ f$ sont homotopes aux identités de X et A .

Démonstration. Tout d'abord, supposons que f est une équivalence faible. On peut le factoriser en $A \xrightarrow{i} W \xrightarrow{p} X$. Comme i est une cofibration acyclique et que A est fibrant, on en déduit qu'il existe un inverse à droite $r : W \rightarrow A$ (c.à.d. $ri = \text{id}_A$). Comme W est fibrant et que i est une cofibration acyclique, on en déduit que $i^* : \text{Hom}_C(W, W) / \xrightarrow{r} \text{Hom}_C(A, W) / \xrightarrow{r}$ est une bijection. Or, $i^*([ir]) = [iri] = [i] = i^*([\text{id}_W])$, d'où $ir \xrightarrow{r} \text{id}_W$.

On en déduit que r est un inverse de i à homotopie (à droite) près. Un argument dual donne un $s : X \rightarrow W$ qui est un inverse de p à homotopie (à gauche) près.

Réciproquement, supposons que f est une équivalence d'homotopie. On factorise f comme $A \xrightarrow{i} W \xrightarrow{p} X$; il suffit de montrer que p est une équivalence faible. Notons que W est bifibrant. Soit $g : X \rightarrow A$ un inverse homotopique de f et $H : C \rightarrow X$ une homotopie entre fg et id_X (où C est un cylindre de X). Alors on peut trouver un relèvement H' dans le diagramme suivant :

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{ig} & C \\ \sim \int i_0 \swarrow H' & & \downarrow p \\ C & \xrightarrow{H} & X \end{array}$$

Soit $s = H' \circ i_1$, qui est homotopie à ig grâce à H' . Comme i est une équivalence faible, c'est une équivalence d'homotopie par ce qu'on vient de montrer; soit r un inverse homotopique de i . Comme $pi = f$, on a $p \sim pir = fr$. De plus $s \sim ig$ donc $sp \sim igp \sim igfr \sim ur \sim \text{id}_C$. On en déduit que sp est une équivalence faible, et p est un rétract de sp :

$$\begin{array}{ccccc} C & \xrightarrow{\text{id}_C} & C & \xrightarrow{\text{id}_C} & C \\ \downarrow p & & \downarrow sp & & \downarrow p \\ X & \xrightarrow{s} & C & \xrightarrow{p} & X \end{array}$$

□

Pour rappel, on note $Q(X) \xrightarrow{\sim} X$ (resp. $X \xrightarrow{\sim} R(X)$) le remplacement cofibrant (resp. fibrant) fonctoriel.

Théorème 2.3.5 (Description de la catégorie homotopique). *La catégorie $\text{Ho}(C)$ est équivalente à πC_{cf} . Pour tous les objets $A, X \in C$,*

$$\text{Hom}_{\text{Ho}(C)}(A, X) \cong \text{Hom}_C(Q(A), R(X)) / \sim .$$

Si $f : A \rightarrow X$ est un morphisme qui devient un isomorphisme dans $\text{Ho}(C)$, alors c'est une équivalence faible.

Démonstration. Nous allons définir un foncteur $\lambda : C \rightarrow \pi C_{cf}$ et montrer qu'il vérifie la propriété universelle de la localisation. On définit simplement $\lambda X = RQX$ sur les objets. L'objet RQX est fibrant par définition; comme QX est cofibrant et que $QX \rightarrow RQX$ est une cofibration, on trouve aussi que RQX est cofibrant. Sur les morphismes, $f : A \rightarrow X$ est envoyé sur la classe de $RQf : RQA \rightarrow RQX$ dans $[RQA, RQX]$.

Vérifions la propriété universelle de λ . Soit $F : C \rightarrow D$ un foncteur qui envoie les équivalences faibles sur des isomorphismes. On veut montrer qu'il existe un unique foncteur $\bar{F} : \pi C_{cf} \rightarrow D$ tel que $\bar{F} \circ \lambda = F$. Sur les objets, on doit poser $\bar{F}(X) = F(X)$. Montrons que F passe au quotient, c.à.d. que si $f, g : A \rightarrow X$ sont deux morphismes

homotopes entre objets fibrants et cofibrants, alors $F(f) = F(g)$. Soit $A \sqcup A \hookrightarrow C \xrightarrow{j} A$ un cylindre pour A et $H : C \rightarrow X$ une homotopie entre f et g , c.à.d. $H \circ i_0 = \tilde{f}$ et $H \circ i_1 = g$. (C est cofibrant, on a vu dans la preuve de Proposition 2.2.10 qu'on pouvait également le choisir tq. j est une fibration donc C est fibrant aussi car A l'est.) On va montrer que $F(i_0) = F(i_1)$. Comme $j : C \rightarrow A$ est une équivalence faible, on en déduit que $F(j)$ est un isomorphisme. Or, $j \circ i_0 = j \circ i_1 = \text{id}_A$ donc $F(j) \circ F(i_0) = F(j) \circ F(i_1)$, d'où $F(i_0) = F(i_1)$. On en déduit alors que $F(f) = F(H \circ i_0) = F(H \circ i_1) = F(g)$.

Montrons que $\text{Hom}_{\text{Ho}(C)}(A, X) \cong \text{Hom}_C(QA, RX)$. Par ce qu'on vient de montrer, $\text{Hom}_{\text{Ho}(C)}(A, X) \cong [QRA, QRX] = \text{Hom}_C(QRA, QRX) / \simeq$. Comme QRA est cofibrant et que $QRX \xrightarrow{\sim} RX$ est une équivalence entre objets fibrants, on a $\text{Hom}_C(QRA, QRX) / \sim \simeq \text{Hom}_C(QRA, RX) / \sim$. De même, ce dernier est en bijection avec $\text{Hom}_C(QA, RX) / \sim$.

Enfin, supposons que $[f : A \rightarrow X]$ est un isomorphisme dans $\text{Ho}(C)$. Grâce au diagramme

$$\begin{array}{ccc} QRA & \xrightarrow{QR(f)} & QRX \\ \downarrow \sim & & \downarrow \sim \\ A & \xrightarrow{f} & X \end{array}$$

on voit qu'il suffit de montrer que $QR(f)$ est une équivalence faible. Grâce au point 1 du théorème, il existe $g : QRX \rightarrow QRA$ tel que $[QRf \circ g] = [\text{id}_{QRX}] \in [QRX, QRX]$ et $[g \circ QRf] = [\text{id}_{QRA}] \in [QRA, QRA]$. Autrement dit, $QRf \circ g \simeq \text{id}_{QRX}$ et $g \circ QRf \simeq \text{id}_{QRA}$. Grâce au théorème de Whitehead, on en déduit que QRf est une équivalence faible. \square

3 Engendrement cofibrant

Nous allons commencer par démontrer que la structure projective définit une catégorie de modèles sur $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$. La preuve fera intervenir des idées que nous allons formaliser sous le nom de « catégories de modèles à engendrement cofibrant » (ou cofibrement engendrée).

3.1 Complexes de chaînes \mathbb{N} -gradués

Pour rappel, $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$ dénote la catégorie des complexes de chaînes concentrés en degrés positifs. Pour un complexe de chaînes $M = (M_n, d_n)_{n \geq 0}$ on définit :

- les cycles $Z_k(M)$ par $Z_0(M) = M_0$ et $Z_k(M) = \ker(d : M_k \rightarrow M_{k-1})$;
- les bords $B_k(M)$ par $B_k(M) = \text{im}(d : M_{k+1} \rightarrow M_k)$;
- l'homologie $H_k(M) = Z_k(M)/B_k(M)$.

Un complexe de chaînes est dit acyclique si $H_k(M) = 0$ pour tout $k \in \mathbb{N}$.

Rappelons également qu'un R -module P est dit projectif si pour toute surjection $A \rightarrow B$, l'application induite $\text{Hom}(P, A) \rightarrow \text{Hom}(P, B)$ est surjective. C'est équivalent à demander qu'il existe un module libre R^n qui se décompose en $P \oplus Q$ (pour un certain Q), ou encore que tout morphisme surjectif $A \rightarrow P$ aie une section.

Définition 3.1.1. On dit qu'un morphisme $f : M \rightarrow N$ de complexes de chaînes est :

- une équivalence faible si c'est un quasi-isomorphisme ;
- une cofibration si pour tout $k \geq 0$, l'application $f_k : M_k \rightarrow N_k$ est injective et son conoyau est projectif ;
- une fibration si pour tout $k > 0$, l'application $f_k : M_k \rightarrow N_k$ est surjective.

Théorème 3.1.2. Ces trois classes de morphismes définissent une structure de catégorie de modèles sur la catégorie $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$, appelée « structure projective ».

Exemple 3.1.3. Soit A et B deux R -modules. Considérons A comme un complexe concentré en degré m (noté $\Sigma^m A$) et B comme un complexe concentré en degré n (noté $\Sigma^n B$). Alors dans la catégorie homotopique, $[\Sigma^m A, \Sigma^n B] \cong \text{Ext}_R^{n-m}(A, B)$.

Lemme 3.1.4. $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$ vérifie les axiomes (MC1), (MC2), (MC3).

Démonstration. Les limites et les colimites se calculent degré par degré dans $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$. L'axiome (MC2) est clair. Pour l'axiome (MC3), on note que le rétract d'un isomorphisme (resp. épimorphisme, monomorphisme) est un isomorphisme (resp. épimorphisme, monomorphisme), et que de plus un rétract d'un module projectif est projectif. \square

Lemme 3.1.5. $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$ vérifie l'axiome (MC4(i)).

Démonstration. Considérons un diagramme commutatif de complexes de chaînes :

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{f} & X \\ \downarrow i & & \sim \downarrow p \\ B & \xrightarrow{g} & Y \end{array}$$

Par définition, p_k est surjectif pour tout $k > 0$. Comme de plus $H_0(X) \rightarrow H_0(Y)$ est un isomorphisme, une petite chasse au diagramme montre que p_0 est surjectif aussi. Soit $K = \ker(p)$, alors on a une suite exacte courte $0 \rightarrow K \rightarrow X \rightarrow Y \rightarrow 0$ donc K est acyclique.

On cherche un relèvement $l : B \rightarrow X$ que nous allons construire par récurrence sur k .

- ($k = 0$) Soit $P_0 = B_0/A_0$. On a une suite exacte courte $0 \rightarrow A_0 \rightarrow B_0 \rightarrow P_0 \rightarrow 0$. Comme P_0 est projectif, cette suite est scindée, donc $B_0 \cong A_0 \oplus P_0$ comme R -modules. On définit alors $l_0 : A_0 \oplus P_0 \rightarrow X_0$ en prenant f_0 sur A_0 et n'importe quel relèvement $P_0 \rightarrow X_0$ et $P_0 \subset B_0 \rightarrow Y_0$.
- (récurrence) Soit $k > 0$. Supposons que l'on a construit des applications $l_j : B_j \rightarrow X_j$ (pour tout $0 \leq j < k$) vérifiant :
 - (i) $dl_j = l_{j-1}d$ pour $1 \leq j < k$,
 - (ii) $p_j l_j = g_j$ et $l_j i_j = f_j$ pour $0 \leq j < k$,

On veut trouver l_k . Comme pour le cas $k = 0$, on a un scindement $B_k \cong A_k \oplus P_k$ et on peut donc définir $\tilde{l}_k : B_k \rightarrow X_k$ qui vérifie le deuxième point, mais il n'est pas forcément compatible avec la différentielle. On définit donc $\zeta : B_k \rightarrow X_{k-1}$ par $\zeta(b) = d(\tilde{l}_k(b)) - l_{k-1}(db)$. Alors on vérifie que :

- $d\zeta = 0$, car $dl_{k-1} = l_{k-2}d$,
- $p_{k-1}\zeta = 0$ car $p_k \tilde{l}_k = g_k$ qui commute avec d ,
- $\zeta i_k = 0$ car $\tilde{l}_k i_k = f_k$ qui commute avec d .

En d'autres termes, ζ induit $\zeta' : B_k/i_k(A_k) \cong P_k \rightarrow Z_{k-1}(K)$. Or, K est acyclique, donc $d : K_k \rightarrow Z_{k-1}(K)$ est surjective. Par projectivité de P_k , on peut relever ζ' en $\zeta'' : P_k \rightarrow K_k$, qu'on peut composer avec l'inclusion pour obtenir $\zeta''' : P_k \rightarrow X_k$. On vérifie alors aisément que $l_k := \tilde{l}_k - \zeta'''$ vérifie les équations demandées. \square

Lemme 3.1.6. $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$ vérifie (MC4(ii)).

L'idée est que le conoyau d'une cofibration acyclique a une forme très particulière.

Définition 3.1.7. Soit A un R -module. Pour $n > 0$, on définit $D_n(A) \in \text{Ch}_{\geq 0}(R)$:

$$\dots \rightarrow 0 \rightarrow \underset{n}{A} \xrightarrow{\text{id}_A} \underset{n-1}{A} \rightarrow 0 \rightarrow \dots$$

Lemme 3.1.8. Pour tout $M \in \text{Ch}_{\geq 0}(R)$, on a une bijection naturelle :

$$\text{Hom}_{\text{Ch}_{\geq 0}(R)}(D_n(A), M) \cong \text{Hom}_{R\text{-Mod}}(A, M_n).$$

En particulier, si $M \rightarrow N$ est surjectif en degré n et que A est projectif, alors toute application $D_n(A) \rightarrow N$ se relève à M . \square

Lemme 3.1.9. Soit $P \in \text{Ch}_{\geq 0}(R)$ un complexe acyclique qui est projectif en chaque degré. Alors tous les $Z_k(P)$ sont projectifs, et P est isomorphe dans $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$ à $\bigoplus_{k \geq 1} D_k(Z_{k-1}(P))$.

Démonstration. On définit un sous-complexe (pour $k \geq 1$) :

$$P_n^{(k)} = \begin{cases} P_n & n \geq k \\ B_{k-1}(P) & n = k-1 \\ 0 & n \leq k-2 \end{cases}$$

Comme P est acyclique, on vérifie que $P^{(k)}/P^{(k+1)} \cong D_k(Z_{k-1}(P))$. Comme $Z_0(P) = P_0$ est projectif, en utilisant le lemme précédent on déduit que $P = P^{(1)} \cong P^{(2)} \oplus D_1(Z_0(P))$. On applique maintenant le même argument à $P^{(2)}$ pour trouver $P^{(2)} \cong P^{(3)} \oplus D_2(Z_1(P))$, etc. \square

Démonstration du Lemme 3.1.6. On se donne un diagramme :

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{f} & X \\ \sim \downarrow i & \nearrow l & \downarrow p \\ B & \xrightarrow{g} & Y \end{array}$$

Le morphisme i est injectif et son conoyau $P = B/A$ vérifie les hypothèses du lemme précédent. On déduit donc que la suite exacte $0 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow P \rightarrow 0$ est scindée, donc $B \cong A \oplus P$ comme complexe de chaînes. On peut donc définir $l : B \rightarrow X$ en utilisant f pour le facteur A et en utilisant n'importe quel relèvement de $P \subset B \xrightarrow{g} Y$ pour le facteur P . \square

3.1.1 L'axiome (MC5)

Il reste à démontrer (MC5). Plutôt que de le faire directement, nous allons illustrer ce qu'on appelle « l'argument du petit objet », qui permet de fabriquer des factorisations

3 Engendrement cofibrant

avec de bonnes propriétés de relèvement dans beaucoup de catégories modèles. Cet argument sera formalisé plus tard.

On considère \mathbb{N} comme une catégorie dont les objets sont les entiers naturels et

$$\mathrm{Hom}_{\mathbb{N}}(m, n) = \begin{cases} * & \text{si } m \leq n, \\ \emptyset & \text{sinon.} \end{cases}$$

Un foncteur (diagramme) $X : \mathbb{N} \rightarrow \mathcal{C}$ n'est rien d'autre qu'une suite d'objets et de morphismes (attention ce n'est pas un complexe de chaînes!) :

$$X_0 \rightarrow X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow \dots$$

Les applications naturelles $X_n \rightarrow \mathrm{colim} X$ induisent, pour tout objet $A \in \mathcal{C}$, une application :

$$\mathrm{colim}_{n \in \mathbb{N}} \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(A, X_n) \rightarrow \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(A, \mathrm{colim}_{n \in \mathbb{N}} X_n).$$

Définition 3.1.10. Un objet $A \in \mathcal{C}$ est \mathbb{N} -petit (ou séquentiellement petit) si pour tout diagramme $X : \mathbb{N} \rightarrow \mathcal{C}$, l'application ci-dessus est une bijection.

Exemple 3.1.11. Un ensemble est \mathbb{N} -petit ssi il est fini. Un R -module est \mathbb{N} -petit ssi il est de présentation fini. Un complexe de chaînes $X \in \mathrm{Ch}_{\geq 0}(R)$ est \mathbb{N} -petit ssi $X_n = 0$ sauf pour un nombre fini de valeurs, et chaque X_n est de présentation finie.

Soit $\mathcal{M} = \{f_i : A_i \rightarrow B_i\}_{i \in I}$ un ensemble de morphismes de \mathcal{C} . On se fixe une application $p : X \rightarrow Y$. On cherche à factoriser p en $X \rightarrow X' \rightarrow Y$ de sorte que $X' \rightarrow Y$ a la RLP par rapport à tous les morphismes de \mathcal{M} . Bien sûr, on pourrait prendre $X' = Y$, mais on veut que X' ressemble le plus possible à X .

On définit $S(\mathcal{M}, p)$ comme étant l'ensemble de tous les diagrammes commutatifs possibles :

$$S(\mathcal{M}, p) = \left\{ (i \in I, g : A_i \rightarrow X, h : B_i \rightarrow Y) \left| \begin{array}{ccc} A_i & \xrightarrow{g} & X \\ \downarrow f_i & & \downarrow p \\ B_i & \xrightarrow{h} & Y \end{array} \text{ commute} \right. \right\}$$

La construction de recollement $G^1(\mathcal{M}, p)$ est alors donnée comme le pushout :

$$\begin{array}{ccccc} \bigsqcup_{(i,g,h) \in S(\mathcal{M},p)} A_i & \xrightarrow{\bigsqcup g} & X & & \\ \downarrow \bigsqcup f_i & \searrow \tau & \downarrow i_1 & \searrow f & \\ \bigsqcup_{(i,g,h) \in S(\mathcal{M},p)} B_i & \longrightarrow & G^1(\mathcal{M}, p) & \xrightarrow{p_1} & Y \\ & \searrow \bigsqcup h & & & \end{array}$$

Le fait que tous les diagrammes de $S(\mathcal{M}, p)$ commutent montrent que l'on a une application induite $p_1 : G^1(\mathcal{M}, p) \rightarrow Y$. On peut ensuite définir par récurrence $G^k(\mathcal{M}, p) = G^1(\mathcal{M}, p_{k-1})$. On récupère :

$$\begin{array}{ccccccc} X & \xrightarrow{i_1} & G^1(\mathcal{M}, p) & \xrightarrow{i_2} & G^2(\mathcal{M}, p) & \xrightarrow{i_2} & \dots \\ \downarrow p & & \downarrow p_1 & & \downarrow p_2 & & \\ Y & \xlongequal{\quad} & Y & \xlongequal{\quad} & Y & \xlongequal{\quad} & \dots \end{array}$$

On pose $G^\infty(\mathcal{M}, p)$ la colimite de la ligne du dessus. Elle est munie d'applications $i_\infty : X \rightarrow G^\infty(\mathcal{M}, p)$ et $p_\infty : G^\infty(\mathcal{M}, p) \rightarrow Y$ telles que $p_\infty i_\infty = p$.

Proposition 3.1.12. *Supposons que tous les A sont \mathbb{N} -petits dans \mathcal{M} . Alors p_∞ a la propriété de relèvement à droite par rapport à tous les morphismes de \mathcal{M} .*

Démonstration. On cherche à résoudre le problème de relèvement suivant :

$$\begin{array}{ccc} A_i & \xrightarrow{g} & G^\infty(\mathcal{M}, p) \\ \downarrow f_i & & \downarrow p_\infty \\ B_i & \xrightarrow{h} & Y \end{array}$$

Comme A_i est \mathbb{N} -petit, on peut factoriser g comme $A_i \xrightarrow{g'} G^k(\mathcal{M}, p) \rightarrow G^\infty(\mathcal{M}, p)$. On obtient donc un diagramme :

$$\begin{array}{ccccccc} A_i & \xrightarrow{g'} & G^k(\mathcal{M}, p) & \xrightarrow{i_{k+1}} & G^{k+1}(\mathcal{M}, p) & \longrightarrow & G^\infty(\mathcal{M}, p) \\ \downarrow f_i & & \downarrow p_k & & \downarrow p_{k+1} & & \downarrow p_\infty \\ B_i & \xrightarrow{h} & Y & \xlongequal{\quad} & Y & \xlongequal{\quad} & Y \end{array}$$

Le triplet (i, g', h) indexe un des morphismes dans la colimite qui définit $G^{k+1}(\mathcal{M}, p)$ à partir de $G^k(\mathcal{M}, p)$. Par construction, on trouve donc une application $B_i \rightarrow G^{k+1}(\mathcal{M}, p)$ qui fait commuter le diagramme, qu'on peut ensuite post-composer avec le morphisme vers $G^\infty(\mathcal{M}, p)$. On obtient ainsi le relèvement voulu. \square

On peut résumer tout ce qui précède (et généralisé à un cardinal quelconque) :

Théorème 3.1.13 (Argument du petit objet). *Soit \mathcal{C} une catégorie cocomplète et $\mathcal{M} = \{f_i : A_i \rightarrow B_i\}$ un ensemble de morphismes de \mathcal{C} . Supposons que tous les A_i sont κ -petits pour un cardinal κ fixé. Tout morphisme $f : X \rightarrow Y$ se factorise en $X \xrightarrow{i_\infty} G^\infty(f, \mathcal{M}) \xrightarrow{p_\infty} Y$ où i_∞ est un complexe \mathcal{M} -cellulaire relatif et p_∞ a la propriété de relèvement à droite par rapport à tous les morphismes de \mathcal{M} . \square*

On va maintenant montrer que les cofibrations et les cofibrations acycliques sont « engendrées » par un petit nombre de cofibrations (acycliques) que l'on va décrire explicitement. On fabriquera la factorisation d'une application quelqu'un en utilisant la construction G^∞ , soit par rapport aux cofibrations génératrices, soit par rapport aux cofibrations acycliques génératrices.

Définition 3.1.14. Pour $n \geq 1$, on définit le « n -disque » $D_n(R)$ et pour $n \geq 0$ la « n -sphère » par :

$$\begin{aligned} D_n(R) : \dots \rightarrow 0 \rightarrow \underset{n}{R} &\xrightarrow{\text{id}_R} \underset{n-1}{R} \rightarrow 0 \rightarrow \dots \\ S_n(R) : \dots \rightarrow 0 \rightarrow \underset{n}{R} &\rightarrow 0 \rightarrow \dots \end{aligned}$$

On définit aussi $D_0(R) = R$ concentré en degré 0, et $S_{-1}(R) = 0$. On a une inclusion évidente $j_n : S_n(R) \rightarrow D_n(R)$ (c'est une cofibration). On note aussi $i_n : 0 \rightarrow D_n(R)$ pour l'inclusion (c'est une cofibration acyclique).

Lemme 3.1.15 (Exercice). Un morphisme $f : X \rightarrow Y$ dans $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$ est :

- une fibration \iff il a la RLP par rapport à tous les i_n ;
- une fibration acyclique \iff il a la RLP par rapport à tous les j_n .

Lemme 3.1.16. La catégorie $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$ vérifie (MC5).

Démonstration. Vérifions d'abord (MC5(i)), c.à.d. on veut factoriser un $f : X \rightarrow Y$ en une cofibration acyclique suivie d'une fibration. On considère la classe $\mathcal{J} = \{j_n : S_n(R) \rightarrow D_n(R)\}$. L'argument du petit objet donne une factorisation de f en $X \xrightarrow{i_\infty} G^\infty(\mathcal{J}, f) \xrightarrow{p_\infty} Y$. Grâce au lemme précédent, p_∞ est une fibration. À chaque étape, l'application $G^k(\mathcal{J}, f) \rightarrow G^{k+1}(\mathcal{J}, f)$ est obtenue en recollant des cofibrations acycliques (les j_n) donc c'est une cofibration acyclique, donc l'application vers la colimite aussi.

Vérifions maintenant (MC5(ii)). On fait la même chose, à part que l'on utilise la classe $\mathcal{I} = \{i_n : 0 \rightarrow D_n(R)\}$ à la place. \square

On a fini de démontrer le théorème !

3.2 Catégories de modèles cofibrement engendrées

Les catégories de modèles cofibrement engendrées sont très importantes en théorie de l'homotopie. (On a vu les complexes de chaînes, on peut aussi repérer le fait que les fibrations de Serre sont définies de manière similaire...) En général, démontrer l'axiome MC5 est difficile, mais si on arrive à trouver un ensemble de cofibrations (acycliques) génératrices, alors c'est plus simple, grâce à l'argument du petit objet. Ça permettra également de calculer les (co)limites homotopiques plus simplement par la suite, et de nombreux théorèmes ne s'appliquent qu'à ces catégories.

Soit $\mathcal{M} = \{A_i \xrightarrow{f_i} B_i\}$ un ensemble de morphismes de C . (Il faudra y penser comme la classe des cofibrations génératrices ou bien des cofibrations acycliques génératrices.)

Définition 3.2.1. Un complexe \mathcal{M} -cellulaire relatif est un morphisme $X \rightarrow Y$ qui est obtenu comme une colimite de type $\text{colim}_{\alpha < \kappa} X_\alpha$ où κ est un ordinal¹, $X_0 = X$, $X_{\alpha+1}$ est obtenu à partir de X_α comme un pushout du type $X_{\alpha+1} = X_\alpha \cup_{A_i} B_i$ pour un morphisme $g : A_i \rightarrow X_\alpha$, et si $\lambda \in \kappa$ est un ordinal limite alors $X_\lambda = \text{colim}_{\alpha < \lambda} X_\alpha$. On note $\mathcal{M}\text{-cell}$ la classe de tels morphismes. Un complexe \mathcal{M} -cellulaire est un objet Y tel que $\emptyset \rightarrow Y \in \mathcal{M}\text{-cell}$.

Exemple 3.2.2. Dans Top , les complexes cellulaires relatifs sont obtenus pour $\mathcal{M} = \{\partial I^n \rightarrow I^n\}$.

Définition 3.2.3. Un morphisme $p : X \rightarrow Y$ est \mathcal{M} -injectif si il a la RLP par rapport à tous les morphismes de \mathcal{M} . On note \mathcal{M}^\perp la classe des morphismes \mathcal{M} -injectifs.

Définition 3.2.4. Un morphisme $i : A \rightarrow B$ est \mathcal{M} -cofibrant si il a la LLP par rapport à tous les morphismes de \mathcal{M}^\perp . On note ${}^\perp(\mathcal{M}^\perp)$ la classe des morphismes \mathcal{M} -cofibrants.

Définition 3.2.5. Une catégorie de modèles $(\mathcal{C}, \mathcal{W}, \mathcal{C}, \mathcal{F})$ est cofibrement engendrée si il existe deux ensembles de morphismes \mathcal{I} (« cofibrations génératrices ») et \mathcal{J} (« cofibrations acycliques génératrices ») tels que :

- les fibrations acycliques sont les morphismes \mathcal{I} -injectifs ($\mathcal{F} \cap \mathcal{W} = \mathcal{I}^\perp$);
- les fibrations sont les morphismes \mathcal{J} -injectifs ($\mathcal{F} = \mathcal{J}^\perp$);
- les sources des morphismes de \mathcal{I} sont petits par rapport à la classe $\mathcal{I}\text{-cell}$;
- les sources des morphismes de \mathcal{J} sont petits par rapport à la classe $\mathcal{J}\text{-cell}$.

Remarque 3.2.6. Les deux premiers points entraînent que $\mathcal{C} = {}^\perp(\mathcal{J}^\perp)$ et $\mathcal{C} \cap \mathcal{W} = {}^\perp(\mathcal{J}^\perp)$. Les deux derniers points se vérifient souvent en choisissant \mathcal{I} et \mathcal{J} de manière à ce que leurs sources soient compacts (donc petits par rapport à tout le monde).

Exemple 3.2.7. On a vu que la structure projective sur $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$ est cofibrement engendrée par $\mathcal{I} = \{S_n(R) \rightarrow D_n(R)\}$ et $\mathcal{J} = \{0 \rightarrow D_n(R)\}$.

Exemple 3.2.8. La structure de Quillen sur Top est cofibrement engendrée par $\mathcal{I} = \{\partial I^n \hookrightarrow I^n\}$ et $\mathcal{J} = \{I^n \hookrightarrow I^{n+1}\}$. Celle de Strøm ne l'est pas.

Proposition 3.2.9. Soit \mathcal{C} une catégorie de modèles cofibrement engendrée par $(\mathcal{I}, \mathcal{J})$. Alors les cofibrations (resp. cofibrations acycliques) sont les rétracts de complexes \mathcal{I} -cellulaires relatifs (resp. complexes \mathcal{J} -cellulaires relatifs).

Démonstration. Démontrons par exemple que $\mathcal{C} = \text{Retract}(\mathcal{I}\text{-cell})$ (l'autre preuve est similaire). Comme les morphismes de \mathcal{J} sont des cofibrations, les rétracts de complexes \mathcal{I} -cellulaires aussi. Réciproquement, soit $i : A \rightarrow B$ une cofibration. En réutilisant l'argument du petit objet, i se factorise en $A \xrightarrow{i_\infty} G^\infty(\mathcal{I}, i) \xrightarrow{p_\infty} B$. Par construction, i_∞ est un complexe \mathcal{I} -cellulaire relatif. On a également démontré que p_∞ a la RLP par

1. en général on peut se restreindre à $\kappa = \mathbb{N}$

3 Engendrement cofibrant

rapport à \mathcal{J} , donc c'est une fibration acyclique, donc elle a la RLP par rapport à i . On peut donc trouver un relèvement dans le diagramme suivant :

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{i_\infty} & G^\infty(\mathcal{J}, i) \\ \downarrow i & \nearrow f & \downarrow p_\infty \\ B & \xlongequal{\quad} & B \end{array}$$

On trouve alors que i est un rétract de i_∞ :

$$\begin{array}{ccccc} A & \xlongequal{\quad} & A & \xlongequal{\quad} & A \\ \downarrow i & & \downarrow i_\infty & & \downarrow i \\ B & \xrightarrow{f} & B & \xrightarrow{p_\infty} & B \end{array}$$

□

En théorie, si on se donne une catégorie \mathcal{C} , on peut récupérer toute la structure de catégorie de modèles : les cofibrations (acycliques) sont les rétracts de complexes \mathcal{J} -cellulaires (\mathcal{J} -cellulaires) relatifs, les fibrations (acycliques) sont les morphismes \mathcal{J} -injectifs (\mathcal{J} -injectifs), et les équivalences faibles sont les morphismes obtenus en composant une cofibration acyclique avec une fibration acyclique. Mais toute la question est de savoir si ça fabrique bien une catégorie de modèles !

Théorème 3.2.10. *Soit \mathcal{C} une catégorie complète et cocomplète, \mathcal{W} , \mathcal{J} et \mathcal{F} trois classes de morphismes. Alors \mathcal{C} est une catégorie de modèles avec \mathcal{W} comme équivalences faibles et \mathcal{J} , \mathcal{F} comme cofibrations (acycliques) génératrices si et seulement si :*

- (1) \mathcal{W} vérifie 2-parmi-3 et est stable par rétracts ;
- (2) les sources des morphismes de \mathcal{J} sont petits par rapport à \mathcal{J} -cell ;
- (3) les sources des morphismes de \mathcal{F} sont petits par rapport à \mathcal{F} -cell ;
- (4) \mathcal{F} -cell $\subset \mathcal{W} \cap {}^\perp(\mathcal{J}^\perp)$;
- (5) $\mathcal{J}^\perp \subset \mathcal{W} \cap \mathcal{F}^\perp$;
- (6) soit ${}^\perp(\mathcal{J}^\perp) \cap \mathcal{W} \subset {}^\perp(\mathcal{F}^\perp)$, soit $\mathcal{F}^\perp \cap \mathcal{W} \subset \mathcal{J}^\perp$.

Démonstration. Les conditions sont clairement nécessaires. Montrons qu'elles sont suffisantes. Rappelons qu'on prend $\mathcal{F} = \mathcal{J}^\perp$ et $\mathcal{C} = {}^\perp(\mathcal{J}^\perp)$. (MC1) est vérifié par hypothèse. (MC2) et la stabilité de \mathcal{W} par rétracts découlent de (1). La stabilité par rétracts de \mathcal{C} et \mathcal{F} viennent du fait qu'on les définit par des propriétés de relèvement, on a donc (MC3).

Les conditions (4) et (5) montrent que les morphismes de \mathcal{J}^\perp sont des fibrations acycliques, et que ceux de \mathcal{F} -cell sont des cofibrations acycliques. L'argument du petit objet, qui marche grâce à (3), fournit une factorisation de tout morphisme f :

$A \rightarrow X$ en $A \xrightarrow{i_\infty} G^\infty(\mathcal{M}, f) \xrightarrow{p_\infty} X$, où $\mathcal{M} = \mathcal{J}$ (resp. \mathcal{J}). Le morphisme i_∞ est un complexe \mathcal{J} -cellulaire (resp. \mathcal{J} -cellulaire). Le même argument que dans la proposition précédente montre que c'est donc bien une cofibration (resp. cofibration acyclique). Le morphisme p_∞ est \mathcal{J} -injectif (resp. \mathcal{J} -injectif) donc c'est une fibration acyclique par (5) (resp. fibration par définition de \mathcal{F}). On a donc bien (MC5).

Reste (MC4), l'axiome de relèvement. On va utiliser (6) ; supposons que $\mathcal{C} \cap \mathcal{W} := {}^\perp(\mathcal{J}^\perp) \cap \mathcal{W} \subset {}^\perp(\mathcal{J}^\perp)$ (l'autre cas est dual). Alors les cofibrations acycliques sont bien la LLP par rapport aux fibrations, soit la moitié de l'axiome. Supposons maintenant que $f : X \rightarrow Y \in \mathcal{J}^\perp \cap \mathcal{W}$ est une fibration acyclique, montrons qu'elle a la RLP par rapport aux cofibrations. Par définition de $\mathcal{C} = {}^\perp(\mathcal{J}^\perp)$, il suffit de vérifier que f a la RLP par rapport aux éléments de \mathcal{J} . Par l'argument du petit objet, on factorise $f = p_\infty i_\infty$ où $i_\infty \in \mathcal{J}\text{-cell} \subset \mathcal{W} \cap {}^\perp(\mathcal{J}^\perp) = \mathcal{W} \cap \mathcal{C}$ (4), et $p_\infty \in \mathcal{J}^\perp \subset \mathcal{W}$ (5). On vient de démontrer que f a la RLP par rapport à $i_\infty \in {}^\perp(\mathcal{J}^\perp)$. On a donc un relèvement :

$$\begin{array}{ccc}
 X & \xlongequal{\quad} & X \\
 \downarrow i_\infty & \nearrow h & \downarrow f \\
 G^\infty(\mathcal{J}, f) & \xrightarrow{p_\infty} & Y
 \end{array}$$

et donc f est un rétract de p_∞ :

$$\begin{array}{ccccc}
 X & \xrightarrow{i_\infty} & G^\infty(\mathcal{J}, f) & \xrightarrow{h} & X \\
 \downarrow f & & \downarrow p_\infty & & \downarrow f \\
 Y & \xlongequal{\quad} & Y & \xlongequal{\quad} & Y
 \end{array}$$

Comme $p_\infty \in \mathcal{J}^\perp \subset \mathcal{F}$ par (4), on en déduit par (MC3) que $f \in \mathcal{F}$. □

Exercice : montrer que les cofibrations (acycliques) génératrices de la structure de Quillen vérifient ces hypothèses.

4 Adjonctions de Quillen

4.1 Foncteurs dérivés

On sait maintenant définir la catégorie homotopique d'une catégorie de modèles et y faire des calculs, notamment quand la catégorie est cofibrement engendrée. Maintenant, si on a un foncteur entre deux catégories de modèles, à quelles conditions a-t-on un foncteur induit entre leur catégorie homotopiques ?

Proposition 4.1.1. *Soit $F : C \rightleftarrows D : G$ une adjonction entre deux catégories de modèles. Les propriétés suivantes sont équivalentes :*

- F préserve les cofibrations et les cofibrations acycliques ;
- G préserve les fibrations et les fibrations acycliques ;
- F préserve les cofibrations et G préserve les fibrations ;
- F préserve les cofibrations acycliques et G préserve les fibrations acycliques.

Définition 4.1.2. Une *adjonction de Quillen* est une adjonction qui vérifie ces propriétés.

Démonstration. Il suffit de jouer un peu avec les propriétés de relèvement. Montrons par exemple que si F préserve les cofibrations alors G préserve les fibrations acycliques. (Tous les autres énoncés sont obtenus de façon similaire.) Soit $p : X \rightarrow \sim Y$ une fibration acyclique. Montrons que $G(p) : X \rightarrow Y$ est une fibration acyclique. Il suffit de montrer que $G(p)$ a la RLP par rapport aux cofibrations. On se donne donc un diagramme et on cherche un relèvement :

$$\begin{array}{ccc} A & \longrightarrow & G(X) \\ \downarrow i & \nearrow & \downarrow G(p) \\ B & \longrightarrow & G(Y) \end{array}$$

Par adjonction, le relèvement existe si et seulement si un relèvement existe dans le diagramme suivant :

$$\begin{array}{ccc} F(A) & \longrightarrow & X \\ \downarrow F(i) & \nearrow \sim & \downarrow p \\ F(B) & \longrightarrow & Y \end{array}$$

Or F préserve les cofibrations donc $F(i)$ est une cofibration dans D . Comme p est une fibration acyclique, on en déduit que le relèvement existe. \square

Exemple 4.1.3. Soit $f : R \rightarrow S$ un morphisme d'anneaux commutatifs. Alors on a une adjonction $f_! : \text{Ch}_{\geq 0}(R) \rightleftarrows \text{Ch}_{\geq 0}(S) : f^*$. On vérifie aisément que c'est une adjonction de Quillen pour les structures projectives.

On rappelle qu'on note $\lambda : C \rightarrow \text{Ho}(C)$ le foncteur de localisation.

Définition 4.1.4. Soit C une catégorie de modèles et soit H une catégorie quelconque.¹ Soit $F : C \rightarrow H$ un foncteur.

1. Un *foncteur dérivé à gauche* de F est un foncteur $\mathbb{L}F : \text{Ho}(C) \rightarrow H$ et une transformation naturelle $\alpha : \mathbb{L}F \circ \lambda \Rightarrow F$ vérifiant la propriété universelle suivante : pour toute paire $(G : \text{Ho}(C) \rightarrow H', \beta : G \circ \gamma \Rightarrow F)$, il existe une unique transformation naturelle $\theta : G \rightarrow \mathbb{L}F$ telle que β soit la composée

$$G \circ \gamma \xRightarrow{\theta \circ \lambda} \mathbb{L}F \circ \gamma \xRightarrow{\alpha} F.$$

2. Un *foncteur dérivé à droite* de F est un foncteur $\mathbb{R}F : \text{Ho}(C) \rightarrow H$ et une transformation naturelle $\varepsilon : F \Rightarrow \mathbb{R}F \circ \lambda$ vérifiant la propriété universelle suivante : pour toute paire $(G : \text{Ho}(C) \rightarrow H', \varphi : F \Rightarrow G \circ \lambda)$, il existe une unique transformation naturelle $\theta : \mathbb{R}F \rightarrow G$ telle que φ soit la composée

$$F \xRightarrow{\varepsilon} \mathbb{R}F \circ \gamma \xRightarrow{\theta \circ \lambda} G \circ \gamma.$$

Si un foncteur dérivé (à droite ou à gauche existe), il est unique à isomorphisme près, comme d'habitude avec les propriétés universelles. Un foncteur dérivé à gauche est, en un certain sens, la meilleure approximation possible à gauche de F comme un foncteur qui factorise par λ (en termes savants, c'est une extension de Kan à droite le long de λ).

Proposition 4.1.5. Soit C une catégorie de modèles, H une catégorie quelconque, et $F : C \rightarrow H$ un foncteur.

1. Si F envoie les cofibrations acycliques entre objets cofibrants sur des isomorphismes, alors $\mathbb{L}F$ existe.
2. Si F envoie les fibrations acycliques entre objets fibrants sur des isomorphismes, alors $\mathbb{R}F$ existe.

La preuve fait appel au Lemme de Brown :

Lemme 4.1.6 (Lemme de Brown). Soit $F : C \rightarrow D$ un foncteur entre deux catégories de modèles.

1. Si F envoie les cofibrations acycliques entre objets cofibrants sur des équivalences faibles, alors F envoie les équivalences faibles entre objets cofibrants sur des équivalences faibles.

1. On y pensera comme $\text{Ho}(D)$.

2. Si F envoie les fibrations acycliques entre objets fibrants sur des équivalences faibles, alors F envoie les équivalences faibles entre objets fibrants sur des équivalences faibles.

Remarque 4.1.7. Un adjoint de Quillen à gauche (resp à droite) vérifie la première propriété donc envoie les équivalences entre objets cofibrants (resp fibrants) sur des équivalences faibles.

Démonstration. Soit $f : A \xrightarrow{\sim} B$ une équivalence faible entre objets cofibrants. On a donc un pushout :

$$\begin{array}{ccc} \emptyset & \hookrightarrow & A \\ \downarrow & \ulcorner & \downarrow \\ B & \longrightarrow & A \sqcup B \end{array}$$

Donc les inclusions $i_A : A \rightarrow A \sqcup B$ et $i_B : B \rightarrow A \sqcup B$ sont des cofibrations.

Le morphisme f induit une application $(\text{id}, f) : A \sqcup B \rightarrow B$. Factorisons-là comme une cofibration suivie d'une fibration acyclique. On obtient un diagramme commutatif :

$$\begin{array}{ccccc} & & B & & \\ & \nearrow f & \uparrow \sim p & \searrow & \\ A & \xrightarrow{i_A} & A \sqcup B & \xleftarrow{i_B} & B \\ & \nwarrow & \uparrow j & \nearrow & \\ & & X & & \end{array}$$

- Comme $p \circ (j \circ i_B) = \text{id}_B \in \mathcal{W}$ et que $p \in \mathcal{W}$, on en déduit que $j \circ i_B \in \mathcal{W}$. De plus $j \in \mathcal{C}$ and $i_B \in \mathcal{C}$ donc $j \circ i_B \in \mathcal{C}$. De plus, sa source (B) et son but (X) sont cofibrants. Par hypothèse sur F , on a donc que $F(j \circ i_B)$ est une éqv.
- De la même manière, on en déduit que $F(j \circ i_A)$ est une éqv.
- Comme $F(p) \circ F(j \circ i_B) = F(\text{id}_B)$ est un iso et que $F(j \circ i_B)$ est un iso, on a que $F(p)$ est une éqv.
- Finalement, $F(f) = F(p) \circ F(j \circ i_A)$ est la composée de deux éqv donc c'est une éqv. \square

Démonstration de la Proposition 4.1.5. Supposons que F envoie les cofibrations acycliques entre objets cofibrants sur des isomorphismes (l'autre cas est dual). Grâce au Lemme de Brown, on en déduit que F envoie les équivalences faibles entre objets cofibrants sur des isomorphismes.

On rappelle que $Q(X) \xrightarrow{p_X} X$ est la résolution cofibrante fonctorielle. On pose $\mathbb{L}F(X) := F(Q(X))$. La flèche naturelle $Q(X) \rightarrow X$ définit une transformation naturelle $\alpha : \mathbb{L}F \Rightarrow F$. Comme F envoie les équivalences faibles entre objets cofibrants sur des isos, $\mathbb{L}F$ ainsi défini se factorise bien par $\text{Ho}(\mathcal{C})$.

Montrons que la paire $(\mathbb{L}F, \alpha)$ vérifie la propriété universelle. Soit $(G : \text{Ho}(\mathcal{C}) \rightarrow \mathcal{H}, \beta : G\lambda \Rightarrow F)$ comme dans la définition. On veut fabriquer $\theta_X : G(X) \rightarrow \mathbb{L}F(X) = F(Q(X))$ qui est naturel en X et tel que $\beta_X = \alpha_X \circ \theta_{\lambda(X)} : G(\lambda(X)) \rightarrow \mathbb{L}F(\lambda(X)) \rightarrow F(X)$. On a que $Q(X) \xrightarrow{\sim} X$ devient un iso dans $\text{Ho}(\mathcal{C})$, donc son image par G est un iso dans \mathcal{H} . On peut donc trouver un relèvement :

$$\begin{array}{ccc} G(Q(X)) & \xrightarrow{\beta_{Q(X)}} & \mathbb{L}F(X) = F(Q(X)) \\ \cong \downarrow G(p_X) & \nearrow \theta_X & \downarrow \alpha_X \\ G(X) & \xrightarrow{\beta_X} & F(X) \end{array}$$

Donc non seulement la transformation θ existe, mais en plus elle est unique (on n'a pas eu le choix : c'était forcément $\beta_{Q(X)} \circ G(p_X)^{-1}$). \square

Définition 4.1.8. Soit $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ un foncteur entre deux catégories de modèles.

1. Un *foncteur dérivé total à gauche* de F est un foncteur dérivé à gauche de $\lambda F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D} \rightarrow \text{Ho}(\mathcal{D})$.
2. Un *foncteur dérivé total à droite* de F est un foncteur dérivé à droite de $\lambda F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D} \rightarrow \text{Ho}(\mathcal{D})$.

On notera encore (abusivement...) $\mathbb{L}F$ et $\mathbb{R}F$ pour les foncteurs dérivés totaux.

Théorème 4.1.9. Soit $F : \mathcal{C} \rightleftarrows \mathcal{D} : G$ une adjonction de Quillen entre deux catégories de modèles. Alors les foncteurs dérivés totaux $\mathbb{L}F, \mathbb{R}G$ existent et forment une adjonction :

$$\mathbb{L}F : \text{Ho}(\mathcal{C}) \rightleftarrows \text{Ho}(\mathcal{D}) : \mathbb{R}G.$$

Démonstration. Le fait qu'ils existent découlent de la proposition qu'on vient de démontrer et de la définition des adjonctions de Quillen. Dans la preuve, on a vu que

$$\mathbb{L}F(A) = F(Q(A)), \quad \mathbb{R}G(X) = G(R(X)),$$

où $Q(-)$ est la résolution cofibrante fonctorielle et $R(-)$ la résolution fibrante fonctorielle. On cherche donc une bijection naturelle :

$$\text{Hom}_{\text{Ho}(\mathcal{D})}(\mathbb{L}F(A), X) \cong \text{Hom}_{\text{Ho}(\mathcal{C})}(A, \mathbb{R}G(X)).$$

Par la description des morphismes dans la catégorie homotopique, cela revient à chercher une bijection naturelle :

$$\text{Hom}_{\mathcal{D}}(F(Q(A)), R(X)) / \sim \cong \text{Hom}_{\mathcal{C}}(Q(A), G(R(X))) / \sim.$$

Comme $F \dashv G$, on a déjà une bijection avant de passer au quotient. Il faut voir qu'elle passe au quotient. Supposons que $f, g : F(Q(A)) \rightarrow R(X)$ sont homotopes. Soit $R(Y) \xrightarrow{\sim} P \rightarrow R(Y) \times R(Y)$ un objet chemin et $H : F(Q(A)) \rightarrow P$ une homotopie. Comme G

préserve les fibrations et les limites, on a que $G(R(Y)) \rightarrow G(P) \rightarrow R(Y) \times R(Y)$. De plus, $R(Y)$ et P sont fibrants, donc G envoie l'équivalence faible entre les deux sur une équivalence faible, donc $G(P)$ est un objet chemin pour $G(R(Y))$. Le morphisme H est adjoint à $H' : Q(A) \rightarrow R(P)$ et on vérifie que c'est une homotopie (à droite) entre les adjoints de f et g . La réciproque est duale. \square

Théorème 4.1.10. *Soit $F : C \rightleftarrows D : G$ une adjonction de Quillen. Les propositions suivantes sont équivalences :*

1. *L'adjonction induite $\mathbb{L}F : \text{Ho}(C) \rightleftarrows \text{Ho}(D) : \mathbb{R}G$ est une équivalence de catégories.*
2. *Pour tout objet cofibrant $A \in C$ et tout objet fibrant $X \in D$, un morphisme $F(A) \rightarrow Y$ est une équivalence faible si et seulement si son adjoint $A \rightarrow G(Y)$ est une équivalence faible.*
3. *Pour tout objet cofibrant $A \in C$ et tout objet fibrant $X \in D$, les deux flèches :*

$$\begin{aligned} A &\xrightarrow{\eta} G(F(A)) \rightarrow G(R(F(A))) \\ F(Q(G(Y))) &\rightarrow F(G(Y)) \xrightarrow{\varepsilon} Y \end{aligned}$$

sont des équivalences faibles.

Démonstration. La démonstration se fait en plusieurs étapes.

2. \implies 3. Le morphisme $A \rightarrow GRF(A)$ est adjoint de $F(A) \rightarrow RF(A)$, qui est une résolution fibrante, donc une équivalence faible. Grâce à 2, on en déduit que $A \rightarrow GRF(A)$ est une équivalence faible. La deuxième partie est duale.
3. \implies 2. Soit A cofibrant, X fibrant, et $f : F(A) \rightarrow Y$ un morphisme. On note $\bar{f} : A \xrightarrow{\eta} GF(A) \xrightarrow{G(f)} G(Y)$ son adjoint. On a un diagramme commutatif :

$$\begin{array}{ccccc} A & \xrightarrow{\eta} & GF(A) & \xrightarrow{G(f)} & G(Y) \\ \parallel & & \downarrow & & \downarrow \sim \\ A & \xrightarrow{\sim} & GRF(A) & \xrightarrow{\sim} & GR(Y) \end{array}$$

où $A \rightarrow GRF(A)$ est une équivalence par hypothèse, $G(Y) \rightarrow GR(Y)$ est une équivalence faible car G préserve les équivalences faibles entre objets fibrants, et $GRF(A) \rightarrow GR(Y)$ est une équivalence faible pour la même raison. On en déduit grâce à 2-parmi-3 que \bar{f} (la ligne du haut) est une équivalence faible. L'autre cas est dual.

2. \implies 1. L'unité de l'adjonction $\mathbb{L}F \dashv \mathbb{R}G$ est $\tilde{\eta} \in \text{Hom}_{\text{Ho}(C)}(A, \mathbb{R}G(\mathbb{L}F(A))) = \text{Hom}_C(QA, GRFQ(A))$. Elle est adjointe à $FQ(A) \rightarrow RFQ(A)$, qui est une équivalence faible dont la source est cofibrante, donc son adjoint est bien une équivalence faible (c.à.d. un isomorphisme dans $\text{Ho}(C)$). Dualement, la counité de l'adjonction est un isomorphisme ; on en déduit que l'adjonction entre catégories homotopiques est une équivalence de catégories.

1. \Rightarrow 3. Supposons que A est cofibrant. On a un diagramme commutatif :

$$\begin{array}{ccc} QA & \xrightarrow{\sim} & GRFQ(A) \\ \downarrow \sim & & \downarrow \\ A & \longrightarrow & GRF(A) \end{array}$$

Comme l'unité de l'adjonction est un isomorphisme, $QA \rightarrow GRFQ(A)$ est une équivalence faible (cf. ci-dessus). Comme $QA \rightarrow A$ est une équivalence entre cofibrants, $F(QA) \rightarrow F(A)$ est une équivalence, donc $RFQ(A) \rightarrow RF(A)$ est une équivalence entre fibrants, donc $GRFQ(A) \rightarrow GRF(A)$ est une équivalence. On en déduit que la flèche du bas est une équivalence, ce qu'on voulait démontrer. L'autre cas est dual. \square

Définition 4.1.11. Une adjonction de Quillen qui vérifie les hypothèses du théorème précédent s'appelle une *équivalence de Quillen*.

On a un critère bien pratique pour vérifier qu'une adjonction de Quillen est une équivalence de Quillen :

Proposition 4.1.12. Soit $F : C \rightleftarrows D : G$ une adjonction de Quillen. Les PSSE :

1. L'adjonction est une équivalence de Quillen.
2. Le foncteur F reflète les équivalences faibles entre objets cofibrants² et pour tout objet fibrant $X \in D$, le morphisme $FQ(X) \rightarrow X$ est une équivalence faible.
3. Le foncteur G reflète les équivalences faibles entre objets fibrants et pour tout objet cofibrant $A \in C$, le morphisme $A \rightarrow GRF(A)$ est une équivalence faible.

Démonstration. Exercice. \square

Exemple 4.1.13. Il y a une équivalence de Quillen entre la structure projective sur $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$ et la structure injective sur $\text{Ch}_{\leq 0}(R)$.

Exemple 4.1.14. L'identité $\text{id} : \text{Ch}_{\geq 0}(R) \rightleftarrows \text{Ch}_{\geq 0}(R) : \text{id}$ est une adjonction de Quillen entre la structure projective et la structure de Strøm. Est-ce que c'est une équivalence de Quillen ?

4.2 Limites et colimites homotopiques

Soit I une petite catégorie (c.à.d. on a un ensemble d'objets et un ensemble de morphismes). Un « diagramme indexé par I » est tout simplement un foncteur $X : I \rightarrow C$, qu'on notera un peu différemment pour insister sur le fait que c'est un diagramme :

2. Cela signifie que si $f : A \rightarrow B$ est un morphisme entre objets cofibrants et que $F(f)$ est une équivalence faible, alors f est une équivalence faible.

la valeur en $i \in I$ est notée X_i et l'image de $\alpha : i \rightarrow j$ est notée $\alpha_* : X_i \rightarrow X_j$. Un morphisme entre diagrammes est une transformation naturelle. On note C^I la catégorie des diagrammes.

On a un foncteur $\text{cst} : C \rightarrow C^I$ tel que $\text{cst}(A)_i = A$ et $\alpha_* = \text{id}_A$ pour tout i, α .

Proposition 4.2.1. – Si C est complète alors cst a un adjoint à droite $\lim_I : C^I \rightarrow C$.

– Si C est cocomplète alors cst a un adjoint à gauche $\text{colim}_I : C^I \rightarrow C$. □

Si C a une notion d'équivalences faibles \mathcal{W} , alors C^I aussi en considérant \mathcal{W}^I (c.à.d. que les équivalences faibles sont définis objet par objet).

Définition 4.2.2. Soit (C, \mathcal{W}) une catégorie avec des équivalences faibles et I une petite catégorie.

- une *colimite homotopique* est un foncteur dérivé total à gauche $\mathbb{L} \text{colim}_I : \text{Ho}(C^I) \rightarrow \text{Ho}(C)$, noté hocolim_I .
- une *limite homotopique* est un foncteur dérivé total à droite $\mathbb{R} \text{lim}_I : \text{Ho}(C^I) \rightarrow \text{Ho}(C)$, noté holim_I .

Remarque 4.2.3. hocolim_I n'est pas une colimite dans $\text{Ho}(C)$! La différence vient essentiellement du fait que $\text{Ho}(C)^I \neq \text{Ho}(C^I)$. Par exemple, si $I = \{a \leftarrow c \rightarrow b\}$, $C = \text{Top}$, et $X \in \text{Top}^I$ est défini par $X_a = X_b = *$ et $X_c = \{0, 1\}$ (avec les seules flèches possibles), alors $\text{hocolim}_I X = S^1$ alors que la colimite dans $\text{Ho}(\text{Top})^I$ est contractile. On peut également trouver des exemples où la (co)limite dans $\text{Ho}(C)$ n'existe même pas, p.ex. le pushout de $* \leftarrow S^1 \xrightarrow{\times 2} S^1$ (exercice).

On va maintenant donner des conditions pour que holim et hocolim existent. Ce qui suit découle directement de ce qu'on connaît sur les foncteurs dérivés d'adjonctions de Quillen.

Lemme 4.2.4. Soit C une catégorie de modèles et I une petite catégorie.

1. Si C^I admet une structure de modèles dont les équivalences faibles contiennent \mathcal{W}^I et tq $\text{cst} : C \rightarrow C^I$ est adjoint de Quillen à droite, alors hocolim_I existe.
2. Si C^I admet une structure de modèles dont les équivalences faibles contiennent \mathcal{W}^I et tq $\text{cst} : C \rightarrow C^I$ est adjoint de Quillen à gauche, alors holim_I existe.

Définition 4.2.5. Soit C une catégorie de modèles et I une petite catégorie.

1. La *structure projective* sur C^I a pour équivalences faibles \mathcal{W}^I et fibrations \mathcal{F}^I . Les cofibrations sont définies par propriété de relèvement.
2. La *structure injective* sur C^I a pour équivalences faibles \mathcal{W}^I et cofibrations \mathcal{C}^I . Les fibrations sont définies par propriété de relèvement.

Lemme 4.2.6. *Si la structure projective (resp. injective) définit une structure de catégorie de modèles sur C^I , alors hocolim_I (resp. holim_I) existe.*

Remarque 4.2.7. Dans ce cas, pour calculer $\text{hocolim}_I X$, il suffit de remplacer X par un objet cofibrant et de calculer sa limite. De même pour holim .

Définition 4.2.8. Une catégorie I est *très petite* si elle a un nombre fini d'objets et s'il existe $N > 0$ tel que toute suite de morphismes $A_0 \xrightarrow{f_0} A_1 \dots A_n$ a au plus N flèches qui ne sont pas des identités.

Exemple 4.2.9. Un ensemble partiellement ordonné fini définit une catégorie très petite.

Théorème 4.2.10. *Si I est très petite alors les structures projective et injective définissent des structures de catégories de modèles sur C^I .*

Démonstration. La preuve complète est laissée en exercice et est un cas particulier d'une théorie beaucoup plus générale, celle des catégories de Reedy (dont les catégories très petites sont des exemples). La preuve marche essentiellement par récurrence. En effet, une catégorie très petite induit un préordre sur les objets de I , en posant $i \leq j \iff \text{Hom}_I(i, j) \neq \emptyset$. Pour montrer que la structure projective est une catégorie de modèles, on procède de la façon suivante. Les axiomes (MC1), (MC2) et (MC3) sont clairs. Comme le poset $\text{ob}(I)$ est fini, il a un élément minimal i_0 . On pose I' la sous-catégorie pleine sur tous les autres objets et on a un foncteur de restriction $U : C^I \rightarrow C^{I'}$. Par récurrence, $C^{I'}$ est une catégorie de modèles. On arrive à décrire les cofibrations de $C^I : f : A \rightarrow X$ est une cofibration si et seulement si

- $f_{i_0} : A_{i_0} \rightarrow X_{i_0}$ est une cofibration ;
- soit $\{j_1, \dots, j_k\}$ les successeurs immédiats de i_0 dans le poset I , on définit $\partial_k(f)$ comme le pushout :

$$\begin{array}{ccc} X_{i_0} & \rightrightarrows & X_{j_k} \\ \downarrow f & \lrcorner & \downarrow \\ Y_{i_0} & \dashrightarrow & \partial_k(f) \end{array}$$

on peut alors définir $X'_j = X_j$ si $j \notin \{i_0, j_1, \dots, j_k\}$ et $X'_{i_k} = \partial_k(f)$; on a un morphisme $X' \rightarrow U(Y)$ dans $C^{I'}$ et on demande qu'il soit une cofibration.

Pour démontrer les axiomes de relèvement ou de factorisation, on commence d'abord par s'occuper de i_0 , et ensuite on trouve des relèvements/factorisations pour le morphisme $X' \rightarrow U(Y)$ compatible avec ce qui se passe en i_0 . \square

Cela permet par exemple de définir les pushouts et les pullbacks homotopiques. Cependant, toutes les catégories d'indices ne sont pas très petites, par exemple \mathbb{N} ne l'est pas. On va introduire une condition sur C qui permet de mettre une structure de catégorie de modèles sur C^I pour tout catégorie petite I .

Définition 4.2.11. Un objet $X \in C$ est *compact* si $\text{Hom}_C(A, -)$ commute avec les colimites filtrées (c.à.d. les colimites indexées par les catégories qui sont *filtrées*, c.à.d. que tout diagramme fini dans I a un cocône – grosso modo une « borne supérieure »).

Définition 4.2.12. Une catégorie de modèles C est *combinatoire* si elle est cofibrement engendrée et qu'il existe un ensemble S d'objets compacts tel que tout objet de C soit une colimite filtrée d'objets de S .

Exemple 4.2.13. La catégorie $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$ est combinatoire, engendrée par les $D_n(R)$ et les $S_n(R)$. La catégorie Top n'est pas combinatoire, mais elle est Quillen équivalente à la catégorie des ensembles simpliciaux (voir la suite) qui l'est.

Théorème 4.2.14. Soit C une catégorie de modèles cofibrement engendrée et I une petite catégorie. Alors la structure projective existe sur C^I (donc les colimites homotopiques existent). Si de plus C est combinatoire, alors la structure injective sur C^I existe (donc les limites homotopiques existent).

Démonstration. Laissée en exercice, l'idée étant de montrer que C^I est cofibrement engendrée en utilisant les théorèmes qu'on a déjà vus. Le cas injectif est assez compliqué. \square

Donnons maintenant quelques exemples de colimites homotopiques.

Exemple 4.2.15. Soit $I = \{j \leftarrow i \rightarrow j'\}$, qui est très petite. Un diagramme $X \in C^I$ est la donnée de trois objets et deux morphismes $B \xleftarrow{f} A \xrightarrow{g} C$. Alors $\text{colim}_I X$ est le pushout de f et g , $B \cup_A C$. Cette notion n'est clairement pas invariante par homotopie : par exemple dans Top , $* \cup_{\{0,1\}} * = *$ alors que $[0, 1] \cup_{\{0,1\}} [0, 1] = S^1$. Pour calculer le pushout homotopique, $\text{hocolim}_I X = B \cup_A^h C$, on doit remplacer notre diagramme par un diagramme cofibrant. On peut montrer qu'un remplacement cofibrant du diagramme est donné par $Q(B) \hookrightarrow Q(A) \hookrightarrow Q(C)$ où les $Q(-)$ sont des résolutions cofibrantes. On calcule alors simplement le pushout de ce nouveau diagramme pour obtenir le pushout homotopique.

Étant donné un diagramme $B \leftarrow A \rightarrow C$, si la catégorie C est *propre à gauche*³ on peut remplacer $A \rightarrow C$ par une cofibration $A \hookrightarrow C' \xrightarrow{\sim} C$ et calculer $B \cup_A^h C = B \cup_A^h C'$.

Dans Top , une manière standard de remplacer une flèche par une cofibration est de considérer son cylindre d'application, $\text{Cyl}(g) = A \times [0, 1] \sqcup C / ((a, 1) \sim g(c))$. On trouve alors $B \cup_A^h C = B \cup_A^h \text{Cyl}(C)$.

Dans $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$ avec la structure projective, pour remplacer $A \xrightarrow{g} C$ par une cofibration, on peut considérer une construction formellement similaire :

$$\text{Cyl}(g) = (A_n \oplus C_n \oplus A_{n-1}, d(a, c, a') = (da + a', dc - g(a'), da')).$$

Alors le pushout homotopique est donné par :

$$B \oplus_A^h C = (B_n \oplus C_n \oplus A_{n-1}, d(b, c, a) = (db + f(a), dc - g(a), da)).$$

3. Cela signifie que le poussé en avant d'une équivalence faible est une équivalence faible. C'est le cas de Top (avec la structure de Quillen) et de $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$.

4 Adjonctions de Quillen

Le tiré en arrière homotopique est la version duale. Exercice : calculer le tiré en arrière homotopique dans Top et $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$.

5 Ensembles simpliciaux

5.1 Notions de base

5.1.1 Définition et propriétés

Définition 5.1.1. La catégorie des simplexes Δ a pour objets les ensembles finis totalement ordonnés $[n] = \{0 < 1 < \dots < n\}$ et pour morphismes les applications croissantes.

On notera un morphisme $f \in \text{Hom}_{\Delta}([m], [n])$ comme une suite $f(0) \rightarrow f(1) \rightarrow \dots \rightarrow f(m)$. Par exemple, l'identité est $0 \rightarrow 1 \rightarrow \dots \rightarrow n$.

Tout morphisme de Δ se factorise uniquement comme une surjection croissante suivie d'une injection croissante. Par ailleurs,

- les injections croissantes sont engendrées par les $\partial^i : [n-1] \rightarrow [n]$ (pour $0 \leq i \leq n$) définis par

$$\partial^i = 0 \rightarrow 1 \rightarrow \dots \rightarrow i-1 \rightarrow i+1 \rightarrow \dots \rightarrow n$$

- les surjections croissantes sont engendrées par les $\sigma^j : [n+1] \rightarrow [n]$ (pour $0 \leq j \leq n$) définis par

$$\sigma^j = 0 \rightarrow \dots \rightarrow j \rightarrow j \rightarrow \dots \rightarrow n$$

On a de plus les « relations cosimpliciales » (qu'il ne faut pas apprendre par cœur... !)

$$\begin{aligned} \partial^j \partial^i &= \partial^i \partial^{j-1} && \text{si } i < j, \\ \sigma^j \partial^i &= \partial^i \sigma^{j-1} && \text{si } i < j, \\ \sigma^j \partial^i &= \text{id} && \text{si } i = j \text{ ou } j+1, \\ \sigma^j \partial^i &= \partial^{i-1} \sigma^j && \text{si } i < j, \\ \sigma^j \sigma^i &= \sigma^{i-1} \sigma^j && \text{si } i < j. \end{aligned}$$

Définition 5.1.2. Un ensemble simplicial est un foncteur $X_{\bullet} : \Delta^{\text{op}} \rightarrow \text{Set}$. On note $s\text{Set}$ la catégorie des ensembles simpliciaux.

Concrètement, un ensemble simplicial est donc la donnée :

- d'une suite d'ensembles, X_0, X_1, X_2, \dots dont les éléments sont appelés les n -simplexes (on appelle parfois « sommets » les éléments de X_0 , « arêtes » ceux de X_1 et « faces » ceux de X_2) ;

- d'applications « faces » $d_i : X_n \rightarrow X_{n-1}$ pour $0 \leq i \leq n$;
- d'applications « dégénérescences » $s_j : X_n \rightarrow X_{n+1}$ pour $0 \leq j \leq n$;
- vérifiant les relations « simpliciales » qui sont les mêmes que les relations cosimpliciales mais où l'on a inverse l'ordre des compositions (par exemple $d_i d_j = d_{j-1} d_i$ pour $i < j$, etc).

Une *application simpliciale* $X_\bullet \rightarrow Y_\bullet$ est la donnée d'applications $f_n : X_n \rightarrow Y_n$ qui commutent avec les faces et les dégénérescences.

Définition 5.1.3. Plus généralement, un *objet simplicial* dans une catégorie \mathcal{C} est un foncteur $\Delta^{\text{op}} \rightarrow \mathcal{C}$. On note $s\mathcal{C}$ la catégorie des objets simpliciaux dans \mathcal{C} .

Définition 5.1.4 (Duale). Un *ensemble cosimplicial* est un foncteur covariant $\Delta \rightarrow \text{Set}$, la catégorie correspondante est notée $c\text{Set}$. On définit aussi la catégorie $c\mathcal{C}$ des objets cosimpliciaux dans une catégorie donnée.

Exemple 5.1.5. Par le Lemme de Yoneda, pour $n \geq 0$ fixé, on a un ensemble simplicial « canonique », le n -simplexe standard Δ_\bullet^n , défini par :

$$\Delta_k^n = \text{Hom}_\Delta([k], [n]).$$

On note par ailleurs que $\text{Hom}_{s\text{Set}}(\Delta_\bullet^n, X_\bullet) \cong X_n$ (toujours le Lemme de Yoneda). On en déduit alors que

$$X_\bullet \cong \text{colim}_{f: \Delta_\bullet^n \rightarrow X_\bullet} \Delta_\bullet^n.$$

Exemple 5.1.6. On remarque que Δ_\bullet^n définit un objet cosimplicial dans les ensembles simpliciaux. Donnons un exemple d'espace cosimplicial qui y ressemble. On définit :

$$\Delta^n := \{(t_0, t_1, \dots, t_n) \in \mathbb{R}^n \mid \forall i, t_i \geq 0, \sum t_i = 1\}.$$

Les cofaces et les codégénérescences sont données par :

$$\begin{aligned} \partial^i(t_0, \dots, t_n) &= (t_0, \dots, t_i, 0, t_{i+1}, \dots, t_n), \\ \sigma^j(t_0, \dots, t_n) &= (t_0, \dots, t_{j-1}, t_j + t_{j+1}, t_{j+2}, \dots, t_n) \end{aligned}$$

On voit par exemple que Δ^0 est un point, $\Delta^1 = [0, 1]$, Δ^2 est un triangle, etc. Les cofaces sont les inclusions des faces de codimension 1, alors que les codégénérescences « écrasent » une dimension.

Définition 5.1.7. Soit X un ensemble simplicial. Un simplexe $x \in X_n$ est dit *dégénéré* si $x = s_i(y)$ avec $y \in X_{n-1}$. Dans le cas contraire, il est dit *non-dégénéré*.

Lemme 5.1.8. Un simplexe dégénéré est obtenu en appliquant une suite de dégénérescences à un unique simple non-dégénéré.

Démonstration. Soit $w = s_{i_0} s_{i_1} \dots s_{i_k}(x) = s_{j_0} s_{j_1} \dots s_{j_l}(y)$ un simplexe dégénéré avec $x \in X_a, y \in X_b$ non dégénéré. Montrons que $x = y$. Grâce aux identités simpliciales,

$$x = d_{i_k} \dots d_{i_0}(w) = d_{i_k} \dots d_{i_0} s_{j_0} \dots s_{j_l}(y).$$

En utilisant les identités simpliciales, on fait passer tous les s à gauche des d et on obtient $x = s_{u_0} \dots s_{u_m} d_{v_1} \dots d_{v_n}(y)$. Or x est non-dégénéré, donc $m = 0$ et $x = d_{v_1} \dots d_{v_n}(y)$. En particulier, $a = b - n \leq b$. Par symétrie, on trouve aussi que $b \leq a$, d'où $a = b$. En reprenant l'égalité ci-dessus, on en déduit $x = y$ (il ne peut pas y avoir de $d \dots$). \square

5.1.2 Adjonction avec les espaces topologiques

On rappelle l'espace cosimplicial standard :

$$\Delta^n = \{(t_0, \dots, t_n) \in (\mathbb{R}_+)^{n+1} \mid t_0 + \dots + t_n = 1\}.$$

Définition 5.1.9. Soit X_\bullet un ensemble simplicial. Sa *réalisation géométrique* est l'espace topologique quotient :

$$|X_\bullet| := \left(\bigsqcup_{n \geq 0} X_n \times \Delta^n \right) / \sim,$$

où la relation d'équivalence est donnée par

$$(d_i(x), t) \sim (x, \partial^i(t)), \quad (s_j(x), t) \sim (x, \sigma^j(t)).$$

Définition 5.1.10. Soit Y un espace topologique. Son *ensemble (simplicial) singulier* est donné par :

$$S_\bullet(Y) := \text{Hom}_{\text{Top}}(\Delta^\bullet, Y),$$

avec les faces et les dégénérescences induites par Δ^\bullet .

Proposition 5.1.11. La réalisation géométrique et l'ensemble singulier définissent une adjonction :

$$|-| : \text{sSet} \rightleftarrows \text{Top} : S_\bullet.$$

Démonstration. Il est clair que $|-|$ et S_\bullet définissent des foncteurs. Montrons qu'ils sont adjoints en définissant des bijections naturelles

$$\varphi : \text{Hom}_{\text{Top}}(|X_\bullet|, Y) \rightleftarrows \text{Hom}_{\text{sSet}}(X, S_\bullet(Y)) : \psi.$$

- Soit $f : X_\bullet \rightarrow S_\bullet(Y)$ une application simpliciale. On a donc des applications $f_n : X_n \rightarrow S_n(Y) = \text{Hom}_{\text{Top}}(\Delta^n, Y)$ qui commutent avec les faces et les dégénérescences. On va définir une application continue $\psi(f) : |X_\bullet| \rightarrow Y$. On commence par définir une application continue

$$\bigsqcup_{n \geq 0} X_n \times \Delta^n \rightarrow Y$$

et on montrera qu'elle est compatible avec la relation d'équivalence. Concrètement, si $(x, t) \in X_n \times \Delta^n$, on lui associe $f_n(x)(t)$. Cette application est bien continue, et on vérifie aisément la compatibilité avec la relation d'équivalence (car f commute avec d_i et s_j).

- Soit $g : |X_\bullet| \rightarrow Y$ une application continue. On définit $\varphi(h) : X_\bullet \rightarrow S_\bullet(Y)$ de la façon suivante. Pour $x \in X_n$, on définit $\varphi(h)_n(x) : \Delta^n \rightarrow Y$ par $\varphi(h)_n(x) : t \mapsto h([x, t])$. On vérifie sans peine que $\varphi(h)_n(x)$ est continue et que $\varphi(h)$ est simpliciale.

On vérifie également sans peine que φ et ψ sont naturelles et inverses l'une de l'autre. \square

Exemple 5.1.12. Soit E un ensemble. On définit l'ensemble simplicial constant E_\bullet par $E_n = E$, et toutes les faces et dégénérescences sont des identités. Alors $|E_\bullet|$ est simplement E vu comme un espace discret.

Exemple 5.1.13. Grâce au lemme de Yoneda, $|\Delta^n| = \Delta^n$.

Exemple 5.1.14 (Exercice). Décrire l'unique ensemble simplicial qui possède exactement deux simplexes non-dégénérés en degrés respectifs 0 et 1. Montrer que sa réalisation géométrique est un cercle.

Remarque 5.1.15. On pourrait remplacer Δ^\bullet par n'importe quel espace cosimplicial et on obtiendrait une adjonction. Plus généralement, étant donné une catégorie cocomplète C et un objet cosimplicial $A^\bullet \in cC$, on obtient une adjonction $sSet \rightleftarrows C$.

5.2 Structure de modèle

On va définir une structure de modèles sur $sSet$ telle que l'adjonction précédente est une équivalence de Quillen. Les définitions des équivalences faibles et des fibrations ressemblent à celles des équivalences faibles d'homotopie et des fibrations de Serre.

Définition 5.2.1. Soit $\text{id}_{[n]} = v_n \in \Delta_n^n$ le seul simplexe non-dégénéré. Le bord du simplexe standard $\partial\Delta_\bullet^n \subset \Delta_\bullet^n$ est le plus petit sous-ensemble simplicial qui contient toutes les faces $d_i v_n$ ($0 \leq i \leq n$). Concrètement, $\partial\Delta_i^n = \{f : [i] \rightarrow [n] \mid f \text{ n'est pas surjective}\}$. On définit aussi (par convention) $\partial\Delta^0 = \emptyset$.

Définition 5.2.2. Soit $n \geq 1$ et $0 \leq k \leq n$. Le k ième cornet $(\Lambda_k^n)_\bullet \subset \Delta_\bullet^n$ est le plus petit sous-ensemble simplicial qui contient les faces $d_i v_n$ pour $i \neq k$. Concrètement, $(\Lambda_k^n)_i$ est composé des applications croissantes $[i] \rightarrow [n]$ dont l'image ne contient pas $[n] - \{k\}$.

Lemme 5.2.3. On a des identifications :

$$\text{Hom}_{sSet}(\Lambda_k^n, X) = \{(y_0, \dots, \hat{y}_k, \dots, y_n) \in (X_{n-1})^{\times n} \mid d_i y_j = d_{j-1} y_i, \forall i < j\},$$

$$\text{Hom}_{sSet}(\partial\Delta^n, X) = \{(y_0, \dots, y_n) \in (X_{n-1})^{\times n+1} \mid d_i y_j = d_{j-1} y_i, \forall i < j\}.$$

La preuve est laissée en exercice.

Définition 5.2.4. Une *fibration de Kan* est une application simpliciale $p : X \rightarrow Y$ qui a la RLP par rapport à toutes les inclusions $\Lambda_k^n \subset \Delta^n$:

$$\begin{array}{ccc} \Lambda_k^n & \longrightarrow & X \\ \downarrow i & \nearrow \exists & \downarrow p \\ \Delta^n & \longrightarrow & Y \end{array}$$

Concrètement, un morphisme est une fibration de Kan si pour tout simplexe $y \in Y_n$ et pour tout n -uplet $z_0, \dots, \hat{z}_k, \dots, z_n \in X_{n-1}$ vérifiant $p(z_i) = d_i(y)$ et $d_i z_j = d_{j-1} z_i \forall i < j$, alors il existe $x \in X_n$ tel que $p(x) = y$ et $d_i(x) = z_i$. Géométriquement, on peut « remplir » le cornet.

Lemme 5.2.5. Une application continue $p : X \rightarrow Y$ est une fibration de Serre si et seulement si $S_\bullet(p)$ est une fibration de Kan.

Remarque 5.2.6. Tous les ensembles simpliciaux ne sont pas fibrants. Par exemple, Δ^n ne l'est pas ! Considérons le couple (y_1, y_2) où $y_0 = 0 \rightarrow 2$ et $y_2 = 0 \rightarrow 1$. Alors il n'existe pas de $x \in \Delta_2^n$ tel que $d_1 x = y_1$ et $d_2 x = y_2$. On aurait nécessairement $x = 0 \rightarrow 2 \rightarrow 1$, qui n'est pas croissante.

On en arrive au théorème :

Théorème 5.2.7. Il existe une structure de catégorie de modèles cofibrement engendrée et combinatoire sur $s\text{Set}$ où :

- les équivalences faibles sont les applications simpliciales $f : X_\bullet \rightarrow Y_\bullet$ telles que $|f| : |X_\bullet| \rightarrow |Y_\bullet|$ est une équivalence d'homotopie faible ;
- les fibrations sont les fibrations de Kan ;
- les cofibrations sont les inclusions.

Pour démontrer ce théorème, on va appliquer le Théorème 3.2.10 sur les catégories de modèles cofibrement engendrées. On choisit comme cofibrations génératrices $\mathcal{I} = \{\partial \Delta^n \subset \Delta^n\}$ et comme cofibrations acycliques génératrices $\mathcal{J} = \{\Lambda_k^n \subset \Delta^n\}$. On a bien par définition que $\mathcal{F} = \mathcal{J}^\perp$. Par ailleurs, les sources des morphismes de \mathcal{I} et \mathcal{J} sont bien petits par rapport à tout ensemble simplicial (grâce à la description des morphismes $\partial \Delta^n \rightarrow \dots$ et $\Lambda_k^n \rightarrow \dots$)

Vérifions que les cofibrations sont les bonnes.

Lemme 5.2.8. Une application simpliciale est une inclusion si et seulement si elle est dans ${}^\perp(\mathcal{J}^\perp)$. De plus toute cofibration est dans \mathcal{J} -cell.

Démonstration. Montrons d'abord que les applications de ${}^\perp(\mathcal{J}^\perp)$ sont injectives. Grâce à l'argument du petit objet, $f : X \rightarrow Y \in {}^\perp(\mathcal{J}^\perp)$ se factorise en $p_\infty i_\infty$ où $i_\infty \in \mathcal{J}$ -cell et $p_\infty = \mathcal{J}^\perp$ (donc c'est une fibration de Kan). En particulier f a la LLP par rapport à p_∞

et on a vu précédemment qu'en conséquence, f était un rétract de i_∞ . Or i_∞ est obtenu comme composée transfinie de pushouts d'injections, donc c'est une injection.

Réciproquement, supposons que $i : A \rightarrow X$ est injective et montrons que c'est une composée dénombrable de pushouts de coproduits d'applications de \mathcal{J} et que donc $i \in \mathcal{J}\text{-cell} \subset {}^\perp(\mathcal{J}^\perp)$. Posons $A_{(0)} = A$. Supposons qu'on a défini une injection $i_k : A_{(k)} \rightarrow X$ qui est un isomorphisme sur les simplexes de dimension $< k$ et étendons-la en une injection $A_{(k+1)} \rightarrow X$ de même type. Soit S_k l'ensemble des k -simplexes de X qui ne sont pas dans l'image de i_k (ils ne peuvent pas être dégénérés), qu'on met en correspondance avec des applications $\Delta^k \rightarrow X$. Pour $s \in S_k$, la restriction de s à $\partial\Delta^k$ se factorise par $A_{(k)}$. On définit alors $A_{(k+1)}$ comme le pushout :

$$\begin{array}{ccc} \coprod_{s \in S_k} \partial\Delta^k & \longrightarrow & A_{(k)} \\ \downarrow & & \downarrow \\ \coprod_{s \in S_k} \Delta^k & \dashrightarrow & A_{(k+1)}. \end{array}$$

L'application induite $A_{(k+1)} \rightarrow X$ est surjective en dimension $\leq k$ par construction. Elle est de plus injective, car on ne rajoute que des simplexes non-dégénérés. \square

Lemme 5.2.9. *Un complexe \mathcal{J} -cellulaire relatif est une cofibration acyclique (c.à.d. dans $\mathcal{J}\text{-cell} \subset \mathcal{W} \cap {}^\perp(\mathcal{J}^\perp)$).*

Démonstration. Les morphismes de \mathcal{J} sont des injections, c.à.d. ils sont dans ${}^\perp(\mathcal{J}^\perp)$. Une classe du type ${}^\perp(\dots)$ est stable par pushouts, donc $\mathcal{J}\text{-cell} \subset {}^\perp(\mathcal{J}^\perp)$.

La réalisation géométrique de $\Lambda_k^n \rightarrow \Delta^n$ est isomorphe à $[0, 1]^{n-1} \subset [0, 1]^n$, donc $|\mathcal{J}|$ est l'ensemble des cofibrations acycliques de Top . Or la réalisation géométrique est un adjoint à gauche donc $|{}^\perp(\mathcal{J}^\perp)| = {}^\perp(|\mathcal{J}|^\perp)$ (exercice), or ${}^\perp(|\mathcal{J}|^\perp)$ est exactement formé par les cofibrations acycliques de Top . En particulier ce sont des équivalences d'homotopie faibles, donc par définition ${}^\perp(\mathcal{J}^\perp) \subset \mathcal{W}$. On en déduit donc que $\mathcal{J}\text{-cell} \subset {}^\perp(\mathcal{J}^\perp) \subset \mathcal{W}$. \square

Lemme 5.2.10. *Les éléments de \mathcal{J}^\perp sont des fibrations de Kan acycliques.*

Démonstration. Soit $p : X \rightarrow Y \in \mathcal{J}^\perp$. On a montré qu'alors p a la RLP par rapport à toutes les inclusions. En particulier elle a la RLP par rapport à \mathcal{J} , c.à.d. $p \in \mathcal{J}^\perp$, donc par définition c'est une fibration de Kan. Reste à montrer que $|p|$ est une équivalence d'homotopie faible. Comme p a la RLP par rapport à toutes les inclusions, on peut trouver un relèvement :

$$\begin{array}{ccc} X & \xlongequal{\quad} & X \\ \downarrow i_X & \nearrow l & \downarrow p \\ X \times Y & \xrightarrow{p_Y} & Y \end{array}$$

Et donc p est un rétract de p_Y :

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{i_X} & X \times Y & \xrightarrow{l} & X \\ \downarrow p & & \downarrow p_Y & & \downarrow p \\ Y & \xlongequal{\quad} & Y & \xlongequal{\quad} & Y \end{array}$$

En particulier, $|p|$ est un rétract de $|p_Y|$, qui est une fibration de Serre, donc $|p|$ aussi. Notons $F = \Delta^0 \times_Y X$ la fibre de p ; on veut montrer que $|F|$ est contractile. Comme p a la RLP par rapport à \mathcal{I} et que $F \rightarrow \Delta^0$ est un pullback de p , alors $F \rightarrow \Delta^0$ aussi. Donc $F \rightarrow \Delta^0$ a la RLP par rapport à toutes les inclusions. En particulier, F est non vide ; soit $f \in F_0$ un 0-simplexe, et $f : F \rightarrow F$ l'application constante égale à f . Alors on a un diagramme commutatif :

$$\begin{array}{ccc} F \times \partial\Delta^1 & \xrightarrow{(\text{id}, f)} & F \\ \downarrow & \nearrow H & \downarrow \\ F \times \Delta^1 & \longrightarrow & \Delta^0 \end{array}$$

où l'on peut trouver un relèvement, qui est une homotopie entre $\text{id}_{|F|}$ et une application constante. On en déduit que F est contractile, donc par la LES en homotopie, $|p|$ est une équivalence d'homotopie faible, donc p est une équivalence faible. \square

Lemme 5.2.11. *Les fibrations acycliques sont dans \mathcal{I}^\perp .*

Démonstration. C'est le point-clé de la preuve, et le plus difficile. On ira voir les références. La preuve repose sur la théorie des fibrations minimales et des extensions anodines ; \square

Démonstration du Théorème 5.2.7. On vient de vérifier toutes les hypothèses du Théorème 3.2.10, donc $s\text{Set}$ admet une structure de catégories de modèles cofibrement engendrée. De plus, $s\text{Set}$ est combinatoire car $\{\Delta^n, \partial\Delta^n\}$ est un ensemble de petits générateurs. \square

5.3 Équivalence avec Top

Théorème 5.3.1. *L'adjonction $| - | : s\text{Set} \rightleftarrows \text{Top} : S_\bullet$ de la Proposition 5.1.11 est une équivalence de Quillen.*

Pour démontrer ce théorème, nous allons faire un petit détour par l'enrichissement de $s\text{Set}$ dans elle-même et par les groupes d'homotopie simpliciaux.

5.3.1 Enrichissement

Nous allons également avoir besoin du fait que la catégorie $s\text{Set}$ est *enrichie* sur elle-même. Cela signifie qu'on peut étendre $\text{Hom}_{s\text{Set}}(A, X)$ en un ensemble simplicial

dont les sommets sont exactement les applications simpliciales $A \rightarrow X$. Les arêtes correspondront aux homotopies entre applications.

Définition 5.3.2. Soit A, X deux ensembles simpliciaux. On définit l'espace des applications simpliciales $\text{Map}_\bullet(A, X)$ par :

$$\text{Map}_n(A, X) = \text{Hom}_{s\text{Set}}(A \times \Delta^n, X).$$

Sa structure simpliciale est induite par la structure cosimpliciale de Δ^\bullet .

Lemme 5.3.3. On a un isomorphisme naturel $\text{Map}_\bullet(\Delta^0, X) \cong X_\bullet$.

Démonstration. C'est essentiellement le Lemme de Yoneda. En effet, $\Delta^0 \times \Delta^n \cong \Delta^n$. On a donc :

$$\text{Map}_n(\Delta^0, X) \cong \text{Hom}_{s\text{Set}}(\Delta^n, X) \cong X_n.$$

On vérifie aisément que cet isomorphisme est compatible avec les faces et les dégénérescences. \square

Lemme 5.3.4. On a un isomorphisme naturel en (A, B, X) :

$$\text{Hom}_{s\text{Set}}(A, \text{Map}(B, X)) \cong \text{Hom}_{s\text{Set}}(A \times B, X).$$

En termes savants, on dit que $s\text{Set}$ est une catégorie enrichie sur $s\text{Set}$ cartésienne fermée.

Démonstration. Définissons une application $\psi : \text{Hom}_{s\text{Set}}(A, \text{Map}(B, X)) \rightarrow \text{Hom}_{s\text{Set}}(A \times B, X)$. Pour $f : A \rightarrow \text{Map}(B, X)$, on pose :

$$\begin{aligned} \psi(f) : A_n \times B_n &\rightarrow X_n, \\ (a, b) &\mapsto \underbrace{f(a)}_{\in \text{Map}_n(B, X) = \text{Hom}_{s\text{Set}}(B \times \Delta^n, X)}(b, \text{id}_{[n]}). \end{aligned}$$

Vérifions que $\psi(f)$ est une application simpliciale. On le vérifie pour les faces, la preuve pour les dégénérescences est identique.

- D'une part, on a $d_i(\psi(f)(a, b)) = d_i(f(a)(b, \text{id}_{[n]}))$. Or $f(a) : B \times \Delta^n \rightarrow X$ est simpliciale, donc $d_i(f(a)(b, \text{id}_{[n]})) = f(a)(d_i(b), \partial^i)$ où $\partial^i \in \Delta_{n-1}^n$.
- D'autre part, $\psi(f)(d_i a, d_i b) = f(d_i a)(d_i b, \text{id}_{[n-1]})$. On f est une application simpliciale, donc $f(d_i a)(d_i b, \text{id}_{[n-1]}) = f(a)(d_i b, \partial^i \circ \text{id}_{[n-1]})$. On a bien l'égalité.

Réciproquement, on définit $\varphi : \text{Hom}_{s\text{Set}}(A \times B, X) \rightarrow \text{Hom}_{s\text{Set}}(A, \text{Map}(B, X))$ de la manière suivante. Pour $g : A \times B \rightarrow X$, on pose :

$$\begin{aligned} \varphi(g)_n : A_n &\rightarrow \text{Map}_n(B, X), \\ a &\mapsto \begin{cases} B_k \times \Delta_k^n \rightarrow X_k, \\ (b, u) \mapsto g_k(u^*(a), b). \end{cases} \end{aligned}$$

Il reste à vérifier (exercice) que $\varphi(g)(a)$ est une application simpliciale $B \times \Delta^n \rightarrow X$, que $\varphi(g)$ est une application simpliciale $A \rightarrow \text{Map}(B, X)$ et enfin que φ et ψ sont inverses l'une de l'autre. \square

On va maintenant montrer que Map se comporte bien par rapport à la structure de modèle. On va utiliser le lemme suivant quand on s'intéressera aux groupes d'homotopie simpliciaux.

Soit $i : A \rightarrow B$ et $p : X \rightarrow Y$ deux applications simpliciales, alors on a un diagramme commutatif :

$$\begin{array}{ccc} \text{Map}(B, X) & \xrightarrow{p_*} & \text{Map}(B, Y) \\ \downarrow i^* & & \downarrow i^* \\ \text{Map}(A, X) & \xrightarrow{p_*} & \text{Map}(A, Y) \end{array}$$

qui induit une application canonique

$$(i^*, p_*) : \text{Map}(B, X) \rightarrow \text{Map}(A, X) \times_{\text{Map}(A, Y)} \text{Map}(B, Y). \quad (5.1)$$

Proposition 5.3.5. *Soit $i : A \hookrightarrow B$ une cofibration et $p : X \twoheadrightarrow Y$ une fibration. Alors le morphisme canonique (i^*, p_*) (5.1) est une fibration. Si de plus i ou f est acyclique, alors (i^*, p_*) est acyclique.*

Lemme 5.3.6. *Soit $i : A \xrightarrow{\sim} B$ une cofibration acyclique et $j : K \hookrightarrow L$ une cofibration. Alors*

$$i \square j : (K \times B) \cup_{K \times A} (L \times A) \rightarrow L \times B$$

est une cofibration acyclique.

On peut déjà démontrer la Proposition 5.3.5 et un corollaire grâce à ce lemme.

Démonstration de la Proposition 5.3.5. Il faut montrer que (i^*, p_*) a la RLP par rapport aux inclusions $\Lambda_k^n \xrightarrow{\sim} \Delta^n$. Or, un diagramme du type de gauche est équivalent à un diagramme du type de droite :

$$\begin{array}{ccc} \Lambda_k^n & \longrightarrow & \text{Map}(B, X) \\ \downarrow \sim & \nearrow & \downarrow (i^*, p_*) \\ \Delta^n & \longrightarrow & \text{Map}(A, X) \times_{\text{Map}(A, Y)} \text{Map}(B, Y) \end{array} \qquad \begin{array}{ccc} (\Lambda_k^n \times B) \cup_{\Lambda_k^n \times A} (\Delta^n \times A) & \longrightarrow & X \\ \downarrow j & \nearrow & \downarrow p \\ \Delta^n \times B & \longrightarrow & Y \end{array}$$

Or $\Lambda_k^n \xrightarrow{\sim} \Delta^n$ est une cofibration acyclique et $A \subset B$ est une cofibration, donc j est une cofibration acyclique par le Lemme 5.3.6. On peut donc trouver un relèvement dans le diagramme de droite, qui correspond à un relèvement dans le diagramme de gauche.

Pour montrer que (i^*, f_*) est acyclique si i ou f l'est, on remplace $\Lambda_k^n \subset \Delta^n$ par $\partial\Delta^n \subset \Delta^n$ et on adapte. \square

Corollaire 5.3.7. *Si $i : A \xrightarrow{\sim} B$ une cofibration acyclique et X un ensemble simplicial fibrant, alors $\text{Map}(B, X) \rightarrow \text{Map}(A, X)$ est une fibration acyclique. Duale, si $p : X \twoheadrightarrow Y$ est une cofibration acyclique et A est cofibrant, alors $\text{Map}(A, X) \rightarrow \text{Map}(A, Y)$ est une fibration acyclique.*

Démonstration. Démontrons le premier cas, le deuxième est dual. Il suffit d'appliquer la proposition précédente à $i : A \rightarrow B$ et à $p : X \rightarrow *$. On a alors $\text{Map}(A, X) \times_{\text{Map}(A, *)} \text{Map}(B, *) \cong \text{Map}(A, X)$. \square

Démonstration du Lemme 5.3.6. On fixe $j : K \hookrightarrow L$. Comme i est une cofibration acyclique, c'est un rétract d'un complexe \mathcal{J} -cellulaire relatif (où $\mathcal{J} = \{\Lambda_k^n \hookrightarrow \Delta^n\}$).

Montrons que la classe des morphismes du type $(-) \square j$ est stable par pushouts. Comme il est de plus clair que $(-) \square j$ envoie les rétracts sur les rétracts, il nous suffira alors de montrer que si $i : \Lambda_k^n \hookrightarrow \Delta^n$ est une cofibration acyclique génératrice, alors $i \square j$ est une cofibration acyclique.

Supposons que $D = B \cup_A C$. On veut montrer qu'on a un pushout :

$$\begin{array}{ccc} (K \times B) \cup_{K \times A} (L \times A) & \longrightarrow & L \times B \\ \downarrow & & \downarrow \\ (K \times D) \cup_{K \times C} (L \times C) & \longrightarrow & L \times D \end{array}$$

On remarque que $L \times D = L \times B \cup_{L \times A} L \times C$. De plus, $K \times D = K \times C \cup_{K \times A} K \times B$, donc

$$\begin{aligned} K \times D \cup_{K \times C} L \times C &= (K \times B \cup_{K \times A} K \times C) \cup_{K \times C} L \times C \\ &= K \times B \cup_{K \times A} L \times C, \end{aligned}$$

d'où on en déduit que

$$\begin{aligned} (K \times D \cup_{K \times C} L \times C) \cup_{K \times B \cup_{K \times A} L \times A} L \times B &= (K \times B \cup_{K \times A} L \times C) \cup_{K \times B \cup_{K \times A} L \times A} L \times B \\ &= L \times C \cup_{L \times A} L \times B = L \times D \end{aligned}$$

(où l'on a utilisé que $K \subset L$ est une inclusion dans le passage à la dernière ligne).

Soit maintenant $i : \Lambda_k^n \hookrightarrow \Delta^n$ une cofibration acyclique génératrice. Montrons que

$$i \square j : \underbrace{K \times \Delta^n \cup_{K \times \Lambda_k^n} L \times \Lambda_k^n}_{X^0} \rightarrow L \times \Delta^n$$

est une cofibration acyclique. Nous allons montrer que $L \times \Delta^n$ s'obtient à partir de X^0 en effectuant un nombre dénombrable de rattachements de cellules $\Lambda_i^d \hookrightarrow \Delta^n$.

finir la preuve

\square

5.3.2 Groupes d'homotopie simpliciaux

Explicitons la relation d'homotopie (à gauche) dans $s\text{Set}$. Si A est un ensemble simplicial, un cylindre naturel est donné par $A \sqcup A = A \times \partial\Delta^1 \hookrightarrow A \times \Delta^1 \xrightarrow{\sim} A$. On en déduit la définition suivante :

Définition 5.3.8. Deux applications simpliciales $f, g : A \rightarrow X$ sont *homotopes* (à gauche) s'il existe $h : A \times \Delta^1 \rightarrow X$ faisant commuter le diagramme :

$$\begin{array}{ccc}
 A = A \times \Delta^0 & & \\
 \downarrow & \searrow f & \\
 A \times \Delta^1 & \xrightarrow{h} & X \\
 \uparrow & \nearrow g & \\
 A = A \times \Delta^0 & &
 \end{array}$$

On sait déjà que si X est fibrant, cela donne une relation d'équivalence sur $\text{Hom}_{\text{sSet}}(A, X)$. On peut raffiner légèrement cette notion.

Définition 5.3.9. Soit A un ensemble simplicial et $B \subset A$ un sous-ensemble simplicial. Deux applications simpliciales $f, g : A \rightarrow X$ dont les restrictions à B coïncident sont *homotopes relativement à B* s'il existe une homotopie h comme ci-dessus satisfaisant $h|_{B \times \Delta^1}(b, w) = f(b) = g(b)$.

Il n'est pas difficile de voir que si X est fibrant, cela induit une relation d'équivalence sur $\{f \in \text{Hom}_{\text{sSet}}(A, X) \mid f|_B = \varphi\}$ pour $\varphi : B \rightarrow X$ fixé.

Définition 5.3.10. Soit X_\bullet un ensemble simplicial fibrant et $v \in X_0$ un sommet. Pour $n \geq 1$, le *nième groupe d'homotopie simplicial* $\pi_n(X_\bullet, v)$ est l'ensemble des applications $\Delta_\bullet^n \rightarrow X_\bullet$ qui sont constamment égales à v sur $\partial\Delta^n$, modulo la relation d'homotopie rel $\partial\Delta^n$.

Remarque 5.3.11. Si on définit $S^n = \partial\Delta^{n+1}$, alors $\pi_n(X, v)$ est l'ensemble des classes d'homotopie pointée des applications pointées $\text{Hom}_{\text{sSet}_*}(S^n, X)$.

Définition 5.3.12. On définit aussi $\pi_0(X_\bullet)$ comme l'ensemble des classes d'homotopie d'applications $\Delta^0 \rightarrow X$ (c.à.d. les sommets de X modulo la relation « être relié par un chemin »).

Concrètement, $\pi_0(X)$ est le quotient de X_0 par la relation suivante : $x \sim y \iff \exists e \in X_1$ tel que $d_0 e = x$ et $d_1 e = y$. (Exercice : vérifier « à la main » que c'est une relation d'équivalence.)

Proposition 5.3.13. Soit X un ensemble simplicial fibrant, $v \in X_0$ un sommet et $n \geq 1$ un entier. Alors $\pi_n(X, v)$ est un groupe, qui est abélien pour $n \geq 2$.

Démonstration. Soit $\alpha, \beta : \Delta^n \rightarrow X$ deux applications qui représentent des classes dans $\pi_n(X, v)$. On définit $[\alpha] \cdot [\beta] \in \pi_n(X, v)$ de la façon suivante. On construit une application $\gamma : \Delta_\bullet^{n+1} \rightarrow X$ en posant $\gamma_i = v$ pour $0 \leq i \leq n-1$, $\gamma_n = \alpha$ et $\gamma_{n+1} = \beta$. (En notation compacte : $\gamma = (v, \dots, v, -, \alpha, \beta)$.) On a bien $d_i \gamma_j = d_{j-1} \gamma_i$. On peut donc trouver une extension $\omega : \Delta_\bullet^{n+1} \rightarrow X$ vérifiant $d_i \omega = \gamma_i$. On pose alors $[\alpha] \cdot [\beta] := [d_n \omega]$.

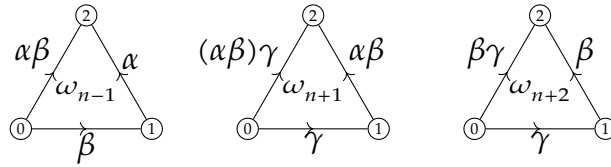
Montrons que cette opération est associative. Le reste des propriétés se prouve exactement comme dans Top (exercice). Soit $\alpha, \beta, \gamma : \Delta^n \rightarrow X$ des applications représentant des éléments de $\pi_n(X, v)$. On peut trouver des simplexes $\omega_{n-1}, \omega_{n+1}, \omega_{n+2}$ vérifiant :

$$\begin{aligned}\partial\omega_{n-1} &= (v, \dots, v, \alpha, d_n\omega_{n-1}, \beta), \\ \partial\omega_{n+1} &= (v, \dots, v, d_n\omega_{n-1}, d_n\omega_{n+1}\gamma), \\ \partial\omega_{n+2} &= (v, \dots, v, \beta, d_n\omega_{n+2}, \gamma).\end{aligned}$$

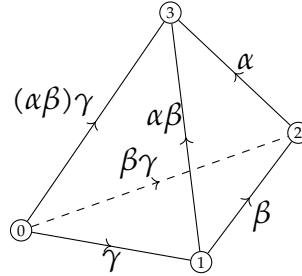
Cela définit une application $(v, \dots, v, \omega_{n-1}, -, \omega_{n+1}, \omega_{n+2}) : \Delta_{n+1}^{n+2} \rightarrow X$, qu'on étend à Δ^{n+2} . On note ζ la n ième face du simplexe trouvé. Alors $\partial\zeta = (v, \dots, v, x, d_n\omega_{n+1}, d_n\omega_{n+2})$, donc :

$$\begin{aligned}([\alpha][\beta])[\gamma] &= [d_n\omega_{n-1}][\gamma] \\ &= [d_n\omega_{n+1}] \\ &= [d_n\zeta] \\ &= [\alpha][d_n\omega_{n+2}] \\ &= [\alpha](\beta)[\gamma].\end{aligned}$$

Avec des dessins, pour $n = 1$:



et :



□

Lemme 5.3.14. Soit X un ensemble simplicial fibrant. Alors $\pi_0(X) \cong \pi_0(|X|)$.

Démonstration. On a une application naturelle $\pi_0(X) \rightarrow \pi_0(|X|)$ qui envoie un sommet sur la composante connexe par arcs de $|X|$ qui le contient. Elle passe au quotient par définition de $|X|$. Elle est clairement surjective (car Δ^n est connexe par arcs). Montrons qu'elle est aussi injective. Pour $\alpha \in \pi_0(X)$, on note X_α le sous-ensemble simplicial formé des simplexes de X dont tous les sommets sont dans α . On vérifie aisément que $X = \bigsqcup_{\alpha \in \pi_0(X)} X_\alpha$. La réalisation géométrique est un adjoint à gauche, donc elle préserve les coproduits. Or le coproduit dans Top est l'union disjointe, donc deux sommets dans des classes différentes de $\pi_0(X)$ différentes sont envoyés dans des composantes connexes différentes de $|X|$. □

Proposition 5.3.15. *Soit X un ensemble simplicial fibrant, $v \in X_0$ un sommet et $n \geq 1$ un entier. Alors $\pi_n(X, v) \cong \pi_n(|X|, |v|)$.*

Démonstration. La preuve fonctionne par récurrence. On vient de démontrer le cas $n = 0$. Supposons maintenant que l'on a montré que $\pi_n(X, v) \cong \pi_n(|X|, |v|)$ pour tout ensemble simplicial fibrant. L'astuce est de traduire le fait que $\pi_{n-1}(\Omega X) \cong \pi_n(X)$ dans le cadre simplicial. On a besoin de quelques lemmes sur les fibrations et les groupes d'homotopie simpliciaux.

Lemme 5.3.16. *Soit $p : X \rightarrow Y$ une fibration acyclique entre ensembles simpliciaux fibrants. Alors $\pi_0(X) \rightarrow \pi_0(Y)$ est une bijection, et pour tout $v \in X_0$ et $n \geq 1$, $\pi_n(X, v) \rightarrow \pi_n(Y, p(v))$ est un isomorphisme.*

Lemme 5.3.17. *Soit $p : X \rightarrow Y$ une fibration de Kan entre ensembles simpliciaux fibrants. Soit $v \in X_0$ un sommet et $F = Y \times_X \{p(v)\}$ la fibre de p . Alors on a une suite exacte longue :*

$$\dots \rightarrow \pi_n(F, v) \rightarrow \pi_n(X, v) \rightarrow \pi_n(Y, p(v)) \rightarrow \pi_{n-1}(F, v) \rightarrow \dots$$

Lemme 5.3.18 (Utile par ailleurs). *La réalisation géométrique d'une fibration de Kan est une fibration de Serre.*

Démonstration. Voir les références. □

On peut maintenant finir de démontrer la proposition. Soit $v \in X_0$ fixé. On définit l'espace des chemins en v par le pullback :

$$\begin{array}{ccc} PX & \dashrightarrow & \text{Map}(\Delta^1, X) \\ \downarrow \pi & \lrcorner & \downarrow (d_0^*, d_1^*) \\ X & \xrightarrow{(v \times \text{id}_X)} & X \times X \end{array}$$

On vérifie que $PX \rightarrow X \rightarrow \{v\}$ est une fibration acyclique, car elle est tirée en arrière de $\text{Map}(\Delta^1, X) \rightarrow \text{Map}(\Delta^0, X)$ qui en est une. On en déduit que $\pi_n(PX) = 0$ pour $n > 0$. Posons $\Omega X = PX \times_X \{v\}$; alors la suite exacte longue en homotopie nous dit que $\pi_{n-1}(\Omega X) \cong \pi_n(X)$ pour $n > 0$. Par ailleurs, $|PX| \rightarrow *$ est la réalisation géométrique d'une fibration acyclique, et on a vu dans le Lemme 5.2.10 que c'était donc une fibration acyclique, en particulier c'est donc une équivalence faible. Comme $|\pi|$ est une fibration de Serre, on récupère une suite exacte longue, qui donne (combiné avec l'isomorphisme précédent) $\pi_{n-1}(|\Omega X|, |v|) \cong \pi_n(|X|, |v|)$. On conclut par l'hypothèse de récurrence. □

5.3.3 Fin de la preuve

Terminons de démontrer que Top et sSet sont équivalentes de Quillen.

Démonstration du Théorème 5.3.1. La réalisation géométrique des cofibrations génératrices (resp. cofibrations acycliques génératrices) sont des cofibrations (resp. cofibrations acycliques), donc l'adjonction est bien une adjonction de Quillen.

On va utiliser le critère de la Proposition 4.1.12 pour montrer que c'est une équivalence. La réalisation géométrique reflète les équivalences faibles par définition. Il nous reste donc à montrer que pour un espace topologique $X \in \text{Top}$,¹ le morphisme $\varepsilon : |S_\bullet(X)| \rightarrow X$ ² est une équivalence d'homotopie faible. En d'autres termes, il faut montrer que $\pi_0(|S_\bullet(X)|) \rightarrow \pi_0(X)$ est une bijection et que $\pi_n(|S_\bullet(X)|, |x|) \rightarrow \pi_n(X, x)$ est un isomorphisme pour tout $x \in X$.

Or, comme $S_\bullet(X)$ est fibrant, on a $\pi_n(|S_\bullet(X)|, |v|) \cong \pi_n(S_\bullet(X), v)$. Une classe de $\pi_n(S_\bullet(X), v)$ est représenté par une application simpliciale $\alpha : \Delta^n \rightarrow S_\bullet(X)$ telle que $\alpha(\partial\Delta^n) = v$. Par adjonction, l'ensemble de ces morphismes est en bijection avec les $\bar{\alpha} : \Delta^n \rightarrow X$ qui vérifie $\bar{\alpha}(\partial\Delta^n) = |v|$. Ces $\bar{\alpha}$ correspondent exactement aux applications continues qui représentent des éléments de $\pi_n(X, x)$. On vérifie par ailleurs que $\text{Hom}_{\text{sSet}}(\Delta^n \times \Delta^1, S_\bullet(X)) \cong \text{Hom}_{\text{Top}}(\Delta^n \times [0, 1], X)$, donc les relations d'équivalences sont exactement les mêmes et on a l'isomorphisme voulu. \square

5.4 Correspondance de Dold–Kan

Comme mentionné au début du chapitre, on peut définir les objets simpliciaux et cosimpliciaux dans n'importe quelle catégorie \mathcal{C} (respectivement comme la catégorie des foncteurs $\Delta^{\text{op}} \rightarrow \mathcal{C}$ et $\Delta \rightarrow \mathcal{C}$). On peut par exemple considérer la catégorie Ab des groupes abéliens. Un groupe abélien simplicial A_\bullet n'est rien d'autre qu'une suite de groupes abéliens $\{A_n\}_{n \geq 0}$ munie de morphismes de groupes $d_i : A_n \rightarrow A_{n-1}$ et $s_j : A_n \rightarrow A_{n+1}$ vérifiant les relations simpliciales.

Théorème 5.4.1 (Dold–Kan). *La catégorie des groupes abéliens simpliciaux sAb est équivalente à la catégorie des complexes de chaînes gradués positivement $\text{Ch}_{\geq 0}(\mathbb{Z})$.*

Démonstration. Nous allons définir une équivalence de catégories

$$N_* : \text{sAb} \rightleftarrows \text{Ch}_{\geq 0}(\mathbb{Z}) : \Gamma_\bullet.$$

Soit $A_\bullet \in \text{sAb}$ un groupe abélien simplicial. On définit le complexe de chaînes $N_*(A_\bullet)$ des « chaînes normalisées » de la façon suivante. En degré n , $N_n(A_\bullet)$ est le groupe abélien

$$N_n(A_\bullet) := A_n / \bigcup_{j=0}^{n-1} s_j(A_{n-1}).$$

La différentielle $d : N_n(A_\bullet) \rightarrow N_{n-1}(A_\bullet)$ est donnée par la somme $d = \sum_{i=0}^n (-1)^i d_i$. On vérifie que d passe au quotient et que $d \circ d = 0$ grâce aux identités simpliciales.

Remarque 5.4.2. Soit X un espace topologique. Alors le complexe des chaînes singulières de X n'est autre que $N_*(S_\bullet(X))$.

1. Quelconque, car tous les espaces topologiques sont fibrants.

2. Pas besoin de prendre un remplacement cofibrant de $S_\bullet(X)$ car tous les ensembles simpliciaux sont cofibrants.

Réciproquement, soit $C_* \in \text{Ch}_{\geq 0}(\mathbb{Z})$ un complexe de chaînes. On définit le groupe abélien simplicial $\Gamma_\bullet(C_*)$ de la manière suivante. En dimension n , on a :

$$\Gamma_n(C_*) = \bigoplus_{\varphi: [n] \rightarrow [p]} C_p.$$

Soit $f \in \Delta_m^n$ une application croissante $[m] \rightarrow [n]$. Décrivons l’application de structure

$$f^* : \bigoplus_{\varphi: [n] \rightarrow [p]} C_p \rightarrow \bigoplus_{\varphi: [m] \rightarrow [q]} C_q$$

sur le facteur correspondant à $\varphi : [n] \rightarrow [p]$. Le morphisme $\varphi \circ f$ se factorise de manière unique en une surjection suivie d’une injection $[m] \xrightarrow{\psi} [q] \xrightarrow{\partial} [p]$.

- Si $p = q$ (et donc $\partial = \text{id}_{[p]}$), alors f^* envoie C_p (indexé par φ) sur $C_q = C_p$ (indexé par ψ).
- Si $p = q + 1$ et $\partial = \partial^p$, alors f^* envoie C_p (indexé par φ) sur $C_q^{(\psi)} = C_{p-1}^{(\psi)}$ (indexé par ψ) avec la différentielle.
- Dans les autres cas, f^* s’annule sur le C_p indexé par φ .

Exemple 5.4.3. Tentons de comprendre $d_2 : \Gamma_2 C \rightarrow \Gamma_1 C$. On rappelle que $d_0 = (\partial^0)^*$ où $\partial^0 = 1 \rightarrow 2 \in \Delta_1^2$.

- On a $\Gamma_1 C = C_1 \oplus C_0$ où le premier facteur est indexé par $\psi_1 = 0 \rightarrow 1 \in \Delta_1^1$ et le second par $\psi_0 = 0 \rightarrow 0 \in \Delta_1^0$.
- On a aussi $\Gamma_2 C = C_2 \oplus C_1 \oplus C_1 \oplus C_0$, où les facteurs sont indexés par $\varphi_2 = 0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \in \Delta_2^2$, $\varphi_1 = 0 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \in \Delta_2^1$, $\varphi'_1 = 0 \rightarrow 0 \rightarrow 1 \in \Delta_2^1$, et $\varphi_0 = 0 \rightarrow 0 \rightarrow 0 \in \Delta_2^0$.

On peut alors décrire d_2 sur chaque facteur de $\Gamma_2 C$:

- Sur $x \in C_2$ indexé par $\varphi_2 = 0 \rightarrow 1 \rightarrow 2$, on a $\varphi_1 \circ \partial^2 = 0 \rightarrow 1 \in \Delta_1^2$. Cette application se factorise en $[1] \xrightarrow{\psi_1} [1] \xrightarrow{\partial^2} [2]$. On a donc $d_2 x = dx \in C_1$ indexé par ψ_1 .
- Sur $x \in C_1$ indexé par φ_1 , on a $\varphi_1 \circ \partial^2 = 0 \rightarrow 1 \in \Delta_1^2$. Cette application se factorise encore $[1] \xrightarrow{\psi_1} [1] \xrightarrow{\partial^2} [2]$, donc $d_2 x = x \in C_1$ indexé par ψ_1 .
- Sur $x \in C_1$ indexé par φ'_1 , on a $\varphi'_1 \circ \partial^2 = 0 \rightarrow 0 \in \Delta_1^2$. Cette application se factorise en $[1] \xrightarrow{\psi_0} [0] \xrightarrow{\partial^2 \partial^1} [2]$. On a donc $d_2 x = 0$.
- Sur $x \in C_0$ indexé par φ_0 , on a $\varphi_0 \circ \partial^2 = 0 \rightarrow 0 \in \Delta_0^2$. Cette application se factorise en $[1] \xrightarrow{\psi_0} [0] \xrightarrow{\partial^2 \partial^1} [2]$, donc encore une fois $d_2 x = 0$.

Il faut ensuite vérifier que ces deux constructions définissent des foncteurs, et que ces deux foncteurs sont inverses l’un de l’autre (exercice). \square

Théorème 5.4.4 (Quillen). *La catégorie $s\text{Ab}$ admet une structure de catégorie de modèle où les équivalences faibles et les fibrations sont définies en considérant les ensembles simpliciaux sous-jacents, et les cofibrations sont les morphismes ayant la propriété de relèvement à gauche par rapport aux fibrations acycliques. Avec cette structure sur $s\text{Ab}$ et la structure projective sur $\text{Ch}_{\geq 0}(\mathbb{Z})$, l’adjonction $N \dashv \Gamma$ est une équivalence de Quillen.*

On se réfère par exemple à [GJ99, Section III.2] pour la preuve. Cette équivalence de Quillen a des propriétés sympathiques. Par exemple :

Proposition 5.4.5. *Soit A_\bullet un groupe abélien simplicial. Alors on a des isomorphismes pour tout $n \geq 0$:*

$$\pi_n(A, 0) \cong H_n(N_*(A_\bullet)).$$

On peut donc facilement construire un espace de type $K(A, n)$: il suffit de considérer le complexe de chaînes C_* avec $C_n = A$ et $C_k = 0$ pour $k \neq n$; alors $|\Gamma_\bullet(C_*)|$ est un espace topologique de type $K(A, n)$. En jouant avec les adjonctions et le fait que $C_*(X) = N_*(S_\bullet(X))$, on peut également montrer que $[X, |\Gamma_\bullet(C_*)|] \cong H^n(X; A)$.

6 Homotopie rationnelle

La théorie de l'homotopie est une théorie puissante, mais les calculs peuvent s'avérer extrêmement complexes. Par exemple, le calcul des groupes d'homotopie d'espaces simples (p.ex. des sphères) reste à l'heure actuelle une tâche inaccessible.

La théorie de l'homotopie rationnelle offre un compromis entre la calculabilité et la quantité d'information donnée sur un espace. Dans cette théorie, on « oublie » la torsion et la non-commutativité dans les groupes d'homotopie d'un espace. Ce faisant, on perd beaucoup d'informations (le plan projectif devient contractile sur \mathbb{Q} , par exemple) mais on gagne en calculabilité : les groupes d'homotopie rationnelle des sphères sont complètement déterminés.

L'idée est la suivante. On considère pour simplifier des espaces simplement connexes. On peut détecter le fait qu'une application continue $f : X \rightarrow Y$ est une équivalence d'homotopie faible en considérant les applications induites sur $\pi_*(-)$, ou bien (comme les espaces sont simplement connexes) sur $H_*(-; \mathbb{Z})$. Or, les groupes d'homotopie $\pi_{\geq 2}$ et les groupes d'homologie $H_*(-; \mathbb{Z})$ sont abéliens, et l'on peut donc les « rationaliser » en appliquant le foncteur $- \otimes_{\mathbb{Z}} \mathbb{Q}$. Cette opération tue la torsion et ne conserve que les rangs des groupes abéliens (s'ils sont de type fini). On peut donc introduire une nouvelle classe « d'équivalences », les équivalences d'homotopie rationnelle, qui sont les applications induisant un isomorphisme sur $\pi_*(-) \otimes_{\mathbb{Z}} \mathbb{Q}$ ou de façon équivalente sur $H_*(-; \mathbb{Q})$.

La théorie de l'homotopie rationnelle s'intéresse à la question de savoir quand deux espaces sont rationnellement équivalents. Pour cela, on se pose la question de savoir quels invariants sont préservés par les équivalences d'homotopie rationnelle. Pour diverses raisons, on se restreint aux espaces simplement connexes. La théorie fondatrice de Sullivan donne la réponse : tous les invariants rationnels possibles de X sont contenus dans l'algèbre différentielle-graduée commutative (CDGA) des formes polynomiales par morceaux $\Omega_{PL}^*(X)$. Cette CDGA est analogue à celle des formes différentielles de de Rham sur une variété lisse, $\Omega_{dR}^*(X)$, cette dernière étant d'ailleurs quasi-isomorphe à $\Omega_{PL}^*(X) \otimes_{\mathbb{Q}} \mathbb{R}$. Plus précisément, le théorème principal de ce chapitre énonce qu'il existe une structure de catégorie de modèles sur les espaces topologiques simplement connexes dont les équivalences faibles sont les équivalences d'homotopie rationnelle, et une équivalence de Quillen entre cette catégorie et les CDGA simplement connexes incarnée par le foncteur Ω_{PL}^* .

Convention 6.0.1. Dans tous ce chapitre, le corps de base sera \mathbb{Q} .

6.1 Localisation de Bousfield

Dans cette section, on localise $s\text{Set}$ par rapport au corps \mathbb{Q} .

Définition 6.1.1. Soit $(C, \mathcal{W}, C, \mathcal{F})$ une catégorie de modèles. Une *localisation de Bousfield à gauche* de C est une structure de catégorie de modèles $(C, \mathcal{W}_{\text{loc}}, C_{\text{loc}}, \mathcal{F}_{\text{loc}})$ ayant les mêmes cofibrations ($C_{\text{loc}} = C$) et plus d'équivalences faibles ($\mathcal{W}_{\text{loc}} \supset \mathcal{W}$).¹

Remarque 6.1.2. Étant donné une catégorie de modèles $(C, \mathcal{W}, C, \mathcal{F})$ et une classe d'équivalences faibles $\mathcal{W}_{\text{loc}} \supset \mathcal{W}$, il n'est pas toujours vrai que la localisation de Bousfield à gauche associée existe. On peut se référer à [Hir03, Theorem 4.1.1] pour un exemple de théorème d'existence.

Remarque 6.1.3. Comme les fibrations sont déterminées comme les morphismes ayant la RLP par rapport aux cofibrations acycliques, on en déduit qu'une localisation de Bousfield à gauche a moins de fibrations que la catégorie originelle, $\mathcal{F}_{\text{loc}} \subset \mathcal{F}$ (car la condition est plus restrictive). En revanche, les fibrations acycliques sont les mêmes ($\mathcal{F}_{\text{loc}} \cap \mathcal{W}_{\text{loc}} = \mathcal{F} \cap \mathcal{W}$) car celles-ci sont données par la RLP par rapport aux cofibrations.

Proposition 6.1.4. Soit $C = (C, \mathcal{W}, C, \mathcal{F})$ une catégorie de modèles et $C_{\text{loc}} = (C, \mathcal{W}_{\text{loc}}, C_{\text{loc}}, \mathcal{F}_{\text{loc}})$ une localisation de Bousfield à gauche. Alors $\text{id}_C : C_{\text{loc}} \rightleftarrows C : \text{id}_C$ est une adjonction de Quillen, et l'adjonction dérivée $\mathbb{L} \text{id} : \text{Ho}(C_{\text{loc}}) \rightleftarrows \text{Ho}(C) : \mathbb{R} \text{id}$ exhibe $\text{Ho}(C_{\text{loc}})$ comme une sous-catégorie réflexive.²

Définition 6.1.5. Un ensemble simplicial X_\bullet est dit *1-réduit* si $X_0 = X_1 = *$ sont des singletons. On note $s\text{Set}_{\geq 2} \subset s\text{Set}$ la sous-catégorie pleine des ensembles simpliciaux 1-réduits.

Remarque 6.1.6. La réalisation géométrique d'un ensemble simplicial 1-réduit est un espace topologique simplement connexe.

Proposition 6.1.7. La catégorie $s\text{Set}_{\geq 2}$ hérite d'une structure de catégorie de modèles de $s\text{Set}$.

Démonstration. Il faut vérifier que la construction des factorisations fonctorielles par l'argument du petit objet préserve la sous-catégorie des espaces 1-réduits. \square

Proposition 6.1.8. Soit $f : X_\bullet \rightarrow Y_\bullet$ une application simpliciale entre ensembles simpliciaux 1-réduits. Les propositions suivantes sont équivalentes :

1. $f_* : H_*(|X|; \mathbb{Q}) \rightarrow H_*(|Y|; \mathbb{Q})$ est un isomorphisme ;
2. $f^* : H^*(|Y|; \mathbb{Q}) \rightarrow H^*(|X|; \mathbb{Q})$ est un isomorphisme ;
3. $f_* : \pi_*(X) \otimes_{\mathbb{Z}} \mathbb{Q} \rightarrow \pi_*(Y) \otimes_{\mathbb{Z}} \mathbb{Q}$ est un isomorphisme.

Démonstration. Cela découle des théorèmes de Whitehead et Hurewicz. \square

1. Une localisation de Bousfield à droite est une structure de catégorie de modèles ayant les mêmes fibrations et plus d'équivalences faibles. Nous n'utiliserons pas cette notion ici.

2. C'est une sous-catégorie pleine et l'inclusion a un adjoint à gauche.

Définition 6.1.9. Une application simpliciale qui vérifie les conditions de la proposition précédente est appelée une *équivalence rationnelle*. On note $\sim_{\mathbb{Q}}$ les équivalences rationnelles.

Théorème 6.1.10 (Quillen [Qui69]). Soit $\mathcal{W}_{\mathbb{Q}}$ la classe des équivalences rationnelles dans $s\text{Set}_{\geq 2}$. Alors la localisation de Bousfield à gauche de $s\text{Set}_{\geq 2}$ par rapport à $\mathcal{W}_{\mathbb{Q}}$ existe. On la note $s\text{Set}_{\geq 2}^{\mathbb{Q}}$.

On peut décrire les objets fibrants de $s\text{Set}_{\geq 2}^{\mathbb{Q}}$.

Définition 6.1.11. Un ensemble simplicial est *rationnel* si tous ses groupes d'homotopie $\pi_n(X)$ sont des \mathbb{Q} -espaces vectoriels.

Proposition 6.1.12. Un ensemble simplicial 1-réduit est fibrant dans $s\text{Set}_{\geq 2}^{\mathbb{Q}}$ si et seulement si il est fibrant dans $s\text{Set}_{\geq 2}$ (c.-à-d. c'est un complexe de Kan) et qu'il est rationnel.

Démonstration. Soit X un ensemble simplicial 1-réduit.

Supposons que $X \rightarrow *$ est une fibration dans $s\text{Set}_{\geq 2}^{\mathbb{Q}}$. Comme $s\text{Set}_{\geq 2}^{\mathbb{Q}}$ a moins de fibrations que $s\text{Set}_{\geq 2}$, on en déduit que $X \rightarrow *$ est une fibration de Kan. Montrons que de plus X est rationnel. Soit $n \geq 2$. L'application canonique $k_* : S^n \rightarrow S^n$ de degré $k \geq 2$ est une équivalence rationnelle, que l'on peut remplacer par une cofibration $i : S^n \xrightarrow{\sim_{\mathbb{Q}}} A$ avec $A \simeq S^n$. L'application i est une cofibration acyclique dans $s\text{Set}_{\geq 2}^{\mathbb{Q}}$. On peut donc trouver un relèvement dans le diagramme suivant :

$$\begin{array}{ccc} S^n & \longrightarrow & X \\ \downarrow \sim_{\mathbb{Q}} & \nearrow & \downarrow \\ A & \longrightarrow & * \end{array}$$

ce qui montre que $\pi_n(X) \xrightarrow{k} \pi_n(X)$ est une bijection. La réciproque utilise la théorie des fibrations minimales (voir Section 5.2) et l'on se réfère à [Qui69, Proposition 2.4] \square

Corollaire 6.1.13. Tout ensemble simplicial 1-réduit a un remplacement rationnel $X \xrightarrow{\sim} X_{\mathbb{Q}}$, où $X_{\mathbb{Q}}$ est un ensemble simplicial rationnel. \square

6.2 Algèbres différentielles graduées commutatives

6.2.1 Définitions

Définition 6.2.1. Un *complexe de cochaînes* (gradué positivement) est un espace vectoriel gradué $V = \bigoplus_{n \geq 0} V^n$ muni de différentielles $d : A^n \rightarrow A^{n+1}$ vérifiant $d \circ d = 0$. On note $\text{Ch}^{\geq 0}(\mathbb{Q})$ la catégorie des complexes de cochaînes et de leurs morphismes.

On note $\deg a = p$ le degré d'un élément homogène $a \in V^p$. Si la notation $\deg a$ apparaît dans une équation, on suppose par défaut que l'élément est homogène quitte à étendre linéairement à tout l'espace gradué.

Définition 6.2.2. Une *algèbre différentielle graduée* (DGA en anglais) est un complexe de cochaînes A muni d'une application bilinéaire $\mu : A \otimes A \rightarrow A$ et d'une unité $\eta : \mathbb{Q} \rightarrow A$ qui est associative et unitaire :

$$\begin{array}{ccc} A \otimes A \otimes A & \xrightarrow{\mu \otimes 1} & A \otimes A \\ \downarrow 1 \otimes \mu & & \downarrow \mu \\ A \otimes A & \xrightarrow{\mu \otimes \mu} & A \end{array} \quad \begin{array}{ccccc} A & \xrightarrow{1 \otimes \eta} & A \otimes A & \xleftarrow{\eta \otimes 1} & A \\ & \searrow \text{id}_A & \downarrow \mu & \swarrow \text{id}_A & \\ & & A & & \end{array}$$

et qui vérifie la relation de Leibniz :

$$d(\mu(a \otimes b)) = \mu(da \otimes b) + (-1)^{\deg a} \mu(a \otimes db).$$

Par la suite, on notera simplement $a \cdot b$ (voire ab) le produit $\mu(a \otimes b)$, et $1 = \eta(1) \in A^0$ sera l'unité. L'associativité s'écrit alors $a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$, l'unitalité $a \cdot 1 = a = 1 \cdot a$, et la relation de Leibniz $d(a \cdot b) = da \cdot b + (-1)^{\deg a} a \cdot db$.

Proposition 6.2.3. Soit A une DGA. Alors la cohomologie $H^*(A)$ est une algèbre graduée.

Démonstration. Cela découle immédiatement de la relation de Leibniz. \square

Définition 6.2.4. Une *algèbre différentielle graduée commutative* (CDGA en anglais) est une DGA qui vérifie la propriété suivante : si $a \in A^p$ et $b \in A^q$ sont des éléments homogènes, alors $b \cdot a = (-1)^{(\deg a)(\deg b)} (a \cdot b)$. On note CDGA la catégorie des CDGA et de leurs morphismes.

Proposition 6.2.5. La cohomologie d'une CDGA est une algèbre graduée commutative. \square

Remarque 6.2.6. Si $a \in A$ est de degré impair, alors l'équation $a \cdot a = -a \cdot a$ entraîne $a^2 = 0$. En revanche, si $b \in A$ est de degré pair, alors il commute avec tous les éléments de A (y compris ceux de degré impair).

Soit V un complexe de cochaînes. Le groupe symétrique \mathfrak{S}_n agit sur $V^{\otimes n}$ avec la « règle des signes de Koszul » (inspirée par la définition d'une algèbre graduée commutative). Concrètement, si $\sigma_i = (i \ i+1) \in \mathfrak{S}_n$ est une transposition (avec $i < j$), alors :

$$(v_1 \otimes \dots \otimes v_i \otimes v_{i+1} \otimes \dots \otimes v_n) \cdot \sigma_i = (-1)^{|v_i||v_{i+1}|} v_1 \otimes \dots \otimes v_{i+1} \otimes v_i \otimes \dots \otimes v_n.$$

On étend cette action à $\mathfrak{S}_n = \langle \sigma_1, \dots, \sigma_{n-1} \mid \sigma_i^2 = 1, \sigma_i \sigma_{i+1} \sigma_i = \sigma_{i+1} \sigma_i \sigma_{i+1} \rangle$ en vérifiant qu'elle est compatible avec les relations. On notera parfois abusivement le signe par \pm .

Définition 6.2.7. Soit G un groupe et V une représentation de G . On définit les *coinvariants* V_G par le quotient V / \sim où $x \sim g \cdot x$. Les *invariants* V^G sont le sous-espace $\{v \in V \mid g \cdot v = v\}$.

Définition 6.2.8. Soit V un complexe de cochaînes. L'algèbre symétrique sur V , notée $S(V)$, est donnée par :

$$S(V) := \bigoplus_{r \geq 0} S^{(r)}(V) := \bigoplus_{r \geq 0} (V^{\otimes r})_{\mathfrak{S}_r}.$$

La différentielle est donnée par la relation de Leibniz :

$$d(v_1 \dots v_n) = \sum_{i=1}^n (-1)^{|v_1| \dots |v_{i-1}|} v_1 \dots v_{i-1} (dv_i) v_{i+1} \dots v_n.$$

Concrètement, $S(V)$ est le tenseur $\mathbb{Q}[V^{\text{pair}}] \otimes \Lambda(V^{\text{impair}})$ de l'algèbre polynomiale sur les éléments pairs et de l'algèbre extérieure sur les degrés impairs. Pour calculer la différentielle, on utilise la règle des signes de Koszul en supposant que le symbole d est de degré 1.

Proposition 6.2.9. On a une adjonction :

$$S : \text{Ch}^{\geq 0}(\mathbb{Q}) \rightleftarrows \text{CDGA} : U,$$

où S est le foncteur « algèbre symétrique » et U est le « foncteur oubli » qui associe le complexe de cochaînes sous-jacent à une CDGA. \square

Concrètement, cela signifie qu'un morphisme de CDGA $f : S(V) \rightarrow A$ est uniquement déterminé par sa restriction à $V \subset S(V)$.

Corollaire 6.2.10. On a un isomorphisme naturel $S(V \oplus W) \cong S(V) \otimes S(W)$.

Démonstration. Le foncteur S étant un adjoint à gauche, il préserve les colimites, qui sont respectivement \oplus dans $\text{Ch}^{\geq 0}(\mathbb{Q})$ et \otimes dans CDGA. \square

Proposition 6.2.11. Soit $A = S(V)$ la CDGA libre sur un complexe de cochaînes V . Alors $H^*(A)$ est l'algèbre symétrique libre sur $H^*(V)$.

Démonstration. Nous ne démontrerons pas cette proposition. Il néanmoins est important de noter que celle-ci n'est vraie qu'en caractéristique nulle. En caractéristique p , le fait que la caractéristique divise le cardinal de \mathfrak{S}_n pour $n \geq p$ pose en effet problème. \square

Définition 6.2.12. Soit A une CDGA et $k \in \mathbb{Z}$ un entier. Une *dérivation* (de degré k) $\delta : A \rightarrow A$ est une application linéaire de degré k vérifiant la relation de Leibniz $\delta(ab) = \delta a \cdot b + (-1)^{k \cdot \deg a} a \cdot \delta b$.

Exemple 6.2.13. La différentielle d'une CDGA est une dérivation de degré 1.

Proposition 6.2.14. Soit $A = S(V)$ une CDGA libre sur un complexe de cochaînes V . Une dérivation $\delta : A \rightarrow A$ est uniquement déterminée par sa restriction à $V \subset A$.

Démonstration. Quasiment identique à la preuve que S est adjoint de U . \square

Décrivons maintenant une généralisation des CDGA libres. Cette généralisation servira à décrire les objets cofibrants de CDGA dans la section suivante.

Définition 6.2.15. Une CDGA A est dite *quasi-libre* si son algèbre graduée commutative sous-jacente est libre.

Cela signifie que $A = (S(V), d)$ où V est un espace vectoriel gradué et $d : S(V) \rightarrow S(V)$ est une dérivation de degré 1 vérifiant $d \circ d = 0$. Comme dans le cas des CDGA libres, cette dérivation d est uniquement déterminée par sa restriction $d|_V$ à $V \subset S(V)$. Cependant, l'image de $d|_V$ n'est pas nécessairement inclus dans V et peut faire intervenir des polynômes de poids supérieur. Cette différentielle restreinte $d|_V$ se décompose en fait en $d_0 + d_1 + \dots$ où $d_i : V \rightarrow S^{(i)}(V) = (V^{\otimes i})_{\mathfrak{S}_i}$ est le terme de poids i .

Exemple 6.2.16. On considère l'espace vectoriel gradué V engendré par deux variables $x = x_2$ et $y = y_3$, de degrés respectifs 2 et 3. L'algèbre symétrique sur V est le produit tensoriel $S(V) = \mathbb{Q}[x] \otimes \Lambda(y)$. On définit une dérivation $d : S(V) \rightarrow S(V)$ par $dx = 0$ et $dy = x^2$, étendue par la relation de Leibniz. On calcule plus précisément que $d(x^k) = 0$ et $d(x^k y) = x^{k+2}$. On vérifie alors aisément que $d \circ d = 0$, donc $(S(V), d)$ est une CDGA quasi-libre. Elle n'est pas libre sur V , car $dy = x^2$ n'est pas linéaire.

L'équation $d \circ d$ se transforme en une suite d'équations compliquées en terme des d_i . On remarque en particulier que d_1 est une différentielle sur V . Un morphisme $f : (S(V), d) \rightarrow (S(W), d)$ entre deux CDGA quasi-libres est entièrement déterminé par sa restriction $f|_V : V \rightarrow S(W)$, qui se décompose en $f_0 + f_1 + \dots$ où $f_i : V \rightarrow S^{(i)}(W)$. L'équation $f \circ d = d \circ f$ devient elle aussi une suite d'équations compliquées. L'une de ces relations dit que $f_1 d_1 = d_1 f_1$. On peut donc définir :

Définition 6.2.17. Soit $f : (S(V), d) \rightarrow (S(W), d)$ un morphisme entre CDGA quasi-libres. La *partie linéaire* de f est l'application induite :

$$f_1 : (V, d_1) \rightarrow (W, d_1).$$

On peut définir un analogue de cette partie linéaire pour les CDGA augmentées.

Définition 6.2.18. Une *augmentation* d'une CDGA A est un morphisme de CDGA $\varepsilon : A \rightarrow \mathbb{Q}$ (qui vérifie donc $\varepsilon(ab) = \varepsilon(a)\varepsilon(b)$, $\varepsilon(1) = 1$ et $\varepsilon(da) = 0$). Une CDGA *augmentée* est une CDGA A munie d'une augmentation ε . Si A est une CDGA augmentée, on note $\bar{A} = \ker \varepsilon$ son *idéal d'augmentation*.

Définition 6.2.19. Soit A une CDGA augmentée. Son *complexe des indécomposables* QA est le quotient $QA = \bar{A}/\bar{A} \cdot \bar{A}$ muni de la différentielle induite. On note alors les « groupes d'homotopie de A »³

$$\pi_n(A) = H^n(QA).$$

3. Il s'agit plutôt de son homologie d'André-Quillen. On verra dans la Section 6.3 que cela correspond effectivement aux groupes d'homotopie d'un espace topologique.

Exemple 6.2.20. Si $A = (S(V), d)$ est quasi-libre, alors $QA \cong (V, d_1)$.

6.2.2 Transfert de la structure de catégorie de modèles

Nous allons chercher à appliquer le théorème suivant à la Proposition 6.2.9.

Définition 6.2.21. Soit $F : D \rightleftarrows C : U$ une adjonction, où D est une catégorie de modèles. On dit qu'un morphisme $f \in \text{Hom}_C(X, Y)$ est une fibration (resp. une équivalence faible) si $U(f)$ en est une, et que c'est une cofibration si f a la LLP par rapport à toutes les fibrations acycliques. La structure de catégorie de modèles ainsi définie sur C – si elle existe – est appelée la *structure transférée à droite*.

Théorème 6.2.22 (Quillen). Soit D une catégorie de modèles cofibrement engendrée par $(\mathcal{I}, \mathcal{J})$. Supposons que les sources des morphismes de \mathcal{I} et \mathcal{J} sont κ -petits pour un cardinal κ donné. Soit $F : D \rightleftarrows C : U$ une adjonction, où C est une catégorie complète et cocomplète.

Si les conditions suivantes sont vérifiées :

1. le foncteur U préserve les colimites κ -séquentielles ;
2. l'une ou l'autre des conditions suivantes est vérifiée :
 - a) si un morphisme de C a la LLP par rapport à toutes les fibrations, alors c'est une équivalence faible ;
 - b) ou pour tout $A \in C$ et tout $X \xrightarrow{f} Y \in \mathcal{J}$, l'application canonique $A \rightarrow A \sqcup_{F(X)} F(Y)$ s'envoie sur une équivalence faible par le foncteur U ;

alors la structure transférée à droite sur C définit bien une structure de catégorie de modèles, cofibrement engendrée par $(F(\mathcal{I}), F(\mathcal{J}))$ (dont les sources sont κ -petits), et l'adjonction $F \dashv U$ est de Quillen.

Avant de démontrer le théorème, donnons d'abord l'application. Pour rappel, $S^n(\mathbb{Q}) \in \text{Ch}^{\geq 0}(\mathbb{Q})$ est le complexe donné par \mathbb{Q} concentré en degré n , et $D^n(\mathbb{Q}) = \dots \rightarrow 0 \rightarrow \mathbb{Q} \xrightarrow{\text{id}_{\mathbb{Q}}} \mathbb{Q} \rightarrow 0 \rightarrow \dots$ concentré en degrés $n - 1, n$.

Proposition 6.2.23. Il existe une structure de catégorie de modèles sur $\text{Ch}^{\geq 0}(\mathbb{Q})$ (appelée structure projective) dont les équivalences faibles sont les quasi-isomorphismes, les fibrations sont les morphismes surjectifs en tout degré, et les cofibrations sont les morphismes injectifs à conoyau projectif en degré strictement positif. Elle est cofibrement engendrée par $\mathcal{I} = \{S^n(\mathbb{Q}) \rightarrow D^n(\mathbb{Q})\}$ et $\mathcal{J} = \{0 \rightarrow D^n(\mathbb{Q})\}$.

Démonstration. Identique à ce qu'on peut trouver dans le Chapitre 3. □

Corollaire 6.2.24. L'adjonction $S : \text{Ch}^{\geq 0}(\mathbb{Q}) \rightleftarrows \text{CDGA} : U$ vérifie les hypothèses du Théorème 6.2.22. La structure de catégorie de modèles transférée à droite sur CDGA existe donc.

Démonstration. Une colimite κ -séquentielle dans CDGA se calcule comme une colimite κ -séquentielle dans $\text{Ch}^{\geq 0}(\mathbb{Q})$ qui est munie d'une structure de CDGA canonique. La condition 1. du théorème est donc vérifiée.

Nous allons maintenant vérifier la condition 2.b) du théorème. On doit donc vérifier que pour tout CDGA A et pour tout $n \geq 0$, l'application canonique (dans la catégorie des CDGAs) $A \rightarrow A \otimes S(D^n(\mathbb{Q}))$ est un quasi-isomorphisme. Grâce à la formule de Künneth, $H^*(A \otimes S(D^n(\mathbb{Q}))) = H^*(A) \otimes H^*(S(D^n(\mathbb{Q})))$. Grâce à la Proposition 6.2.11, $H^*(S(D^n(\mathbb{Q}))) = S(H^*(D^n(\mathbb{Q})))$ et il est immédiat que $D^n(\mathbb{Q})$ est acyclique. On en déduit donc que $H^*(A \otimes S(D^n(\mathbb{Q}))) = H^*(A)$, et on vérifie sans peine que $A \rightarrow A \otimes S(D^n(\mathbb{Q}))$ induit l'identité en cohomologie. \square

Remarque 6.2.25. Nous avons utilisé deux fois l'hypothèse que le corps de base était \mathbb{Q} (ou plus généralement un corps de caractéristique zéro) :

- pour appliquer la formule de Künneth, il est nécessaire de se placer au-dessus d'un corps ;
- pour $H^*(S(V)) = S(H^*(V))$, il est nécessaire d'avoir un corps de caractéristique zéro.

Démonstration du Théorème 6.2.22. Vérifions que \mathcal{C} est une catégorie de modèles avec les classes considérées. L'axiome (MC1) – complète + cocomplète – est vrai par hypothèse. L'axiome (MC2) – 2 parmi 3 – est vrai car U est un foncteur et que D vérifie (MC2). De même, les fibrations et les équivalences faibles de \mathcal{C} sont stables par rétracts ; comme les classes de morphismes définies par propriété de relèvement sont stables par rétract, on en déduit que les cofibrations de \mathcal{C} sont également stables par rétract et que l'axiome (MC3) est vérifié.

L'axiome (MC4)(i) – $\mathcal{C} \perp \mathcal{F} \cap \mathcal{W}$ – est vrai par définition des cofibrations de \mathcal{C} . Reste à vérifier (MC4)(ii) – $\mathcal{C} \cap \mathcal{W} \perp \mathcal{F}$ – et (MC5) – les factorisations. On aura besoin de quelques lemmes.

Lemme 6.2.26. *Un morphisme $f \in \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, Y)$ est une fibration (resp. fibration acyclique) si et seulement si il a la RLP par rapport à $F(\mathcal{I})$ (resp. $F(\mathcal{J})$).*

Démonstration. Exercice (découle du fait que $F \dashv U$ et que D est cofibrement engendré par $(\mathcal{I}, \mathcal{J})$). \square

Lemme 6.2.27. *Les rétracts de complexes $F(\mathcal{J})$ -cellulaire (resp. $F(\mathcal{J})$ -cellulaire) ont la LLP par rapport aux fibrations acycliques (resp. aux fibrations).*

Démonstration. Découle du point précédent et de la stabilité des classes de type ${}^\perp(-)$ par pushouts et rétracts. \square

Lemme 6.2.28. *Tout rétract d'un complexe $F(\mathcal{J})$ -cellulaire est une équivalence faible dans \mathcal{C} .*

Démonstration. Corollaire du lemme précédent et de la condition 2. du théorème. \square

On peut maintenant démontrer (MC5) grâce à l'argument du petit objet. Étant donné $f \in \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, Y)$, on peut le factoriser en $X \rightarrow G^\infty(F(\mathcal{J}), f) \rightarrow Y$. Dans le premier cas, $X \rightarrow G^\infty(F(\mathcal{J}), f)$ est un complexe $F(\mathcal{J})$ -cellulaire, donc une cofibration ; de plus $G^\infty(F(\mathcal{J}), f) \rightarrow Y$ a la RLP par rapport à $F(\mathcal{J})$, donc c'est une fibration acyclique. L'autre partie de (MC5) est similaire en remplaçant \mathcal{J} par \mathcal{J} .

Démontrons finalement (MC4)(ii). Soit $i : A \rightarrow B$ une cofibration acyclique, c.-à-d. i a la LLP par rapport aux fibrations acycliques et $U(i)$ est une équivalence faible. Montrons que i a la LLP par rapport aux fibrations. Grâce à l'argument du petit objet, on peut factoriser i en $A \xrightarrow{i_\infty} G^\infty(F(\mathcal{J}), i) \xrightarrow{p_\infty} B$, où i_∞ est un complexe \mathcal{J} -cellulaire et p_∞ est une fibration. Grâce à 2 parmi 3, p est en fait une fibration acyclique. On peut donc trouver un relèvement dans le diagramme suivant :

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{j} & G^\infty(F(\mathcal{J}), i) \\ \downarrow i_\infty & \nearrow i & \downarrow p_\infty \\ B & \xlongequal{\quad} & B \end{array}$$

On obtient alors que i est un rétract de i_∞ . Or i_∞ est un complexe \mathcal{J} -cellulaire et a donc la LLP par rapport aux fibrations par l'un des lemmes ci-dessus, ce qui permet de conclure. \square

6.2.3 Théorie de Sullivan

Tous les CDGA sont fibrants. Dans cette section, nous allons décrire les objets cofibrants. Nous allons également décrire explicitement comment représenter les homotopies entre morphismes de CDGA.

Définition 6.2.29. Une *algèbre de Sullivan* est une CDGA quasi-libre $A = (S(V), d)$ où $V = V^{\geq 1}$ et qui est munie d'une filtration du complexe de cochaînes V par des sous-complexes :

$$0 \subset V(0) \subset V(1) \subset V(2) \subset \dots \subset V,$$

telle que $d(V(0)) = 0$ et $d(V(k+1)) \subset S(V(k))$ pour $k \geq 0$.

Une *algèbre relative de Sullivan* est une inclusion $A \rightarrow (A \otimes S(V), d)$ où $V = V^{\geq 1}$ est filtré $V(0) \subset V(1) \subset \dots \subset V$ tel que $d(V(0)) \subset A$ et $d(V(k+1)) \subset A \otimes S(V(k))$.

Définition 6.2.30. Une *algèbre minimale* est une algèbre de Sullivan $A = (S(V), d)$ telle que $d(V(k)) \subset S^{(\geq 2)}(V(k-1))$, c.-à-d. la différentielle est décomposable. Une *algèbre relative minimale* est une algèbre de Sullivan relative qui vérifie une condition analogue.

Exemple 6.2.31. La CDGA $A = (S(x_2, y_3), dy = x^2)$ est une algèbre minimale. En effet, on peut poser $V(0) = \langle x \rangle$, $V(1) = \langle x, y \rangle$.

Exemple 6.2.32. Les CDGA $S(D^n(\mathbb{Q}))$ et $S(S^n(\mathbb{Q}))$ sont des algèbres de Sullivan. La première n'est pas minimale mais la seconde l'est. L'inclusion $S(S^n(\mathbb{Q})) \rightarrow S(D^n(\mathbb{Q}))$ est une algèbre relative minimale.

Exemple 6.2.33. L'algèbre $A = (S(x_1, y_1, z_1), dx = yz, dy = zx, dz = xy)$ n'est pas de Sullivan.

Proposition 6.2.34. Une CDGA A est cofibrante si et seulement si c'est un rétract d'une algèbre de Sullivan. De même, $i : A \rightarrow B$ est une cofibration si et seulement si c'est un rétract d'une algèbre relative de Sullivan.

Démonstration. Les cofibrations génératrices $\mathcal{J} = \{S(S^n(\mathbb{Q})) \rightarrow S(D^n(\mathbb{Q}))\}$ sont des algèbres relatives de Sullivan donc toutes les cofibrations sont des algèbres relatives de Sullivan.⁴ \square

Remarque 6.2.35. Une algèbre minimale $A = (S(V), d)$ est automatiquement augmentée, et ses groupes d'homotopie (Définition 6.2.19) sont donnés par $\pi_n(A) = V^n$.

Proposition 6.2.36. Soit $f : A = (S(V), d) \rightarrow B = (S(W), d)$ un morphisme entre algèbres de Sullivan. Alors f est un quasi-isomorphisme si et seulement si $f_1 : (V, d_1) \rightarrow (W, d_1)$ en est un. Si de plus les deux algèbres sont minimales, alors f est un quasi-isomorphisme si et seulement si c'est un isomorphisme.

Démonstration. La preuve du premier énoncé repose sur des arguments de suite spectrale que nous ne détaillerons pas (exercice).

Pour le deuxième énoncé, il est clair que si f est un isomorphisme alors c'est un quasi-isomorphisme. Réciproquement, si f est un quasi-isomorphisme, alors par le premier point f_1 est un quasi-isomorphisme. Comme les algèbres sont minimales, $d_1 = 0$, donc f_1 est en fait un isomorphisme. On a un morphisme de suites exactes longues (associées aux suites exactes courtes du type $\bar{A}^2 \rightarrow \bar{A} \rightarrow QA$) :

$$\begin{array}{ccccccccccc} 0 \rightarrow H^1(\bar{A}^2) = 0 \rightarrow H^1(\bar{A}) = H^1(QA) \rightarrow H^2(\bar{A}^2) \rightarrow H^2(\bar{A}) \rightarrow H^2(QA) \rightarrow \dots \\ \parallel \qquad \qquad \cong \downarrow f_1 \qquad \cong \downarrow f_1 \qquad \downarrow \qquad \downarrow \qquad \downarrow \\ 0 \rightarrow H^1(\bar{B}^2) = 0 \rightarrow H^1(\bar{B}) = H^1(QB) \rightarrow H^2(\bar{B}^2) \rightarrow H^2(\bar{B}) \rightarrow H^2(QB) \rightarrow \dots \end{array}$$

On applique alors le lemme des cinq par récurrence et on utilise le fait que $H^n(\bar{A}^2)$ s'exprime uniquement en termes de $V^{<n}$ (grâce à $V = V^{\geq 1}$) pour conclure. \square

Définition 6.2.37. Un *modèle de Sullivan* (resp. *modèle minimal*) d'une CDGA A est une algèbre de Sullivan (resp. minimale) $(S(V), d)$ munie un quasi-isomorphisme $(S(V), d) \xrightarrow{\sim} A$. Un modèle de Sullivan (resp. minimal) d'un morphisme $f : A \rightarrow B$ est une factorisation $A \rightarrow (A \otimes S(V), d) \xrightarrow{\sim} B$ où $A \rightarrow (A \otimes S(V), d)$ est une algèbre relative de Sullivan (resp. minimale).

En utilisant les axiomes de catégories de modèles, toute CDGA a un modèle de Sullivan, et tout morphisme a un modèle de Sullivan. Deux modèles minimaux d'une même CDGA sont isomorphes.

4. Pour trouver la filtration, on considère la filtration $G^0(\mathcal{J}, -) \subset G^1(\mathcal{J}, -) \subset \dots \subset G^\infty(\mathcal{J}, -)$ dans l'argument du petit objet.

Exemple 6.2.38. Considérons la cohomologie de la sphère S^2 . Elle est donnée par $H^*(S^2) = \mathbb{Q} \oplus \mathbb{Q}x_2$, où x est un élément de degré 2 de carré nul. Cette algèbre n'est pas libre sur x malgré les apparences : comme $\deg x$ est pair, la relation $x^2 = 0$ est non-triviale. Pour trouver un modèle minimal, on « résout » la relation $x^2 = 0$ en rajoutant un générateur y dont la différentielle « tue » x^2 . On obtient alors $A = (S(x_2, y_3), dy = x^2)$ qui est bien une algèbre minimale, et le morphisme $A \rightarrow H^*(S^2)$ donné par $x \mapsto x$ et $y \mapsto 0$ est bien un quasi-isomorphisme.

Exemple 6.2.39. Un cas assez intéressant de modèle minimal de morphisme est celui de la multiplication⁵ $\mu : A \otimes A \rightarrow A$ où $A = (S(V), d)$ est une algèbre minimale. Il faut trouver une factorisation $(S(V) \otimes S(V), d) \rightarrow (S(V) \otimes S(V) \otimes S(W), D) \xrightarrow{\sim} (S(V), d)$ de μ , où la première application est l'inclusion canonique et la seconde est un quasi-isomorphisme. Pour W , on prend $V[-1]$, une copie de V décalée en degré de 1 vers le haut (c.-à-d. que si $v \in V^k$, alors l'élément correspondant $\bar{v} \in W^{k+1}$ est en degré $k+1$). Le but est de fabriquer une différentielle D sur $S(V) \otimes S(V) \otimes S(V[-1])$ qui étend les différentielles de $S(V)$ (c.-à-d. que $D(v \otimes 1 \otimes 1) = dv \otimes 1 \otimes 1$ et $D(1 \otimes v \otimes 1) = 1 \otimes dv \otimes 1$) et telle que $D(1 \otimes 1 \otimes \bar{v})$ vient identifier à homotopie près $v \otimes 1 \otimes 1$ et $1 \otimes v \otimes 1$. Celle-ci se construit par récurrence, voir par exemple [FOT08, Exemple 2.48].

Nous allons maintenant expliciter la relation d'homotopie (à droite) entre morphismes de CDGA. Comme on l'a vu dans la Section 2.2.2, pour définir une homotopie entre $f, g : A \rightarrow B$, on doit trouver un objet chemin pour la CDGA B . Il existe une manière simple (et naturelle !) d'en trouver un pour toute CDGA B . Elle est inspirée de constructions topologiques : dans Top , un objet chemin pour un espace X est simplement donné par $X \times I$ où $I = [0, 1]$ est un intervalle. En prenant un peu d'avance (voir la Section 6.3 : on a $I = \Omega_{\text{PL}}^*(\Delta^1)$), on pose :

Définition 6.2.40. L'intervalle dans CDGA est la CDGA quasi-libre $I = (S(t, dt), d)$ où $\deg t = 0$, $\deg dt = 1$, et la différentielle est donnée par $d(t) = dt$ et $d(dt) = 0$.

Lemme 6.2.41. Soit B une CDGA quelconque. Un objet chemin pour B est donné par

$$B \xrightarrow{\sim} B \otimes I \xrightarrow{(ev_0, ev_1)} B \oplus B,$$

où $B \rightarrow B \otimes I$ est l'inclusion canonique et les morphismes ev_0, ev_1 sont définis par :

$$ev_i(b \otimes P(t)) = P(i) \cdot b, \quad ev_i(b \otimes P(t)dt) = 0.$$

Définition 6.2.42. Une homotopie de Sullivan entre deux morphismes de CDGA $f, g : A \rightarrow B$ est un morphisme de CDGA $H : A \rightarrow B \otimes I$ tel que $f = (1 \otimes ev_0)H$ et $g = (1 \otimes ev_1)H$.

Concrètement, une homotopie de Sullivan $H : A \rightarrow B \otimes I$ entre f et g est de la forme

$$H(a) = H_0(a) + H_1(a)t + H_2(a)t^2 + \dots + H'_0(a)dt + H'_1(a)tdt + H'_2(a)t^2dt + \dots$$

5. Comme A est commutative, on vérifie que μ est bien un morphisme de CDGA.

où $H_0(a) = f(a)$, $\sum_{i \geq 0} H_i(a) = g(a)$ et H vérifie une suite d'équations imposant que H est un morphisme d'algèbres et $H \circ d = d \circ H$ (par exemple $H_1(ab) = f(a)H_1(b) + H_1(a)f(b)$, $H'_0(da) = f(a)$, etc).

Proposition 6.2.43. *Soit $A = (S(V), d)$ une algèbre de Sullivan. Alors deux morphismes $f, g : A \rightarrow B$ sont homotopes à droite si et seulement si ils sont homotopes de Sullivan.*

Démonstration. Comme $B \otimes I$ est un objet chemin pour B , alors par définition une homotopie de Sullivan est une homotopie à droite. Réciproquement, supposons que f et g sont homotopes à droite, c.-à-d. qu'il existe un objet chemin $B \xrightarrow{\sim} P \rightarrow B \times B$ et une homotopie à droite $H : A \rightarrow P$ entre f et g . On peut trouver un relèvement dans le carré commutatif :

$$\begin{array}{ccc} B & \xrightarrow{\sim} & B \otimes I \\ \downarrow \sim & \nearrow l & \downarrow (ev_0, ev_1) \\ P & \twoheadrightarrow & B \times B \end{array}$$

et alors $l \circ H$ est une homotopie de Sullivan entre f et g . □

On termine sur une définition utile dans la section suivante :

Définition 6.2.44. Une CDGA A est dite 1-réduite si $A^0 = \mathbb{Q}$ (nécessairement engendré par l'unité) et $A^1 = 0$. On note $CDGA_{\geq 2} \subset CDGA$ la sous-catégorie pleine des CDGA 1-connexes.

Proposition 6.2.45. *La sous-catégorie $CDGA_{\geq 2} \subset CDGA$ hérite d'une structure de catégorie de modèles.*

Démonstration. Comme pour $sSet_{\geq 2} \subset sSet$, il faut vérifier que les relèvements et les factorisations restent dans la sous-catégorie. □

6.3 Comparaison entre CDGA et homotopie rationnelle

Nous allons montrer qu'il existe une équivalence de Quillen entre $CDGA_{\geq 2}$ et $sSet_{\geq 2}^{\mathbb{Q}}$.
Remarque 6.3.1. On sait depuis peu que cette équivalence peut se généraliser au cadre des ensemble simpliciaux connexes et nilpotents [FHT15].

6.3.1 L'adjonction

L'adjonction est inspirée par la CDGA des formes différentielles de de Rham d'une variété lisse, adaptée pour les ensembles simpliciaux quelconques et avec des coefficients rationnels plutôt que réels. L'idée est qu'un ensemble simplicial formé de simplexes recollés les uns aux autres ; une forme sur un ensemble simpliciale est donc simplement une forme sur chaque simplexe, compatible avec les faces et les dégénérescences.

On rappelle que la réalisation géométrique de Δ^n est homéomorphe à l'espace topologique $\Delta^n = \{(t_0, \dots, t_n) \in \mathbb{R}^{n+1} \mid t_i \geq 0, t_0 + \dots + t_n = 1\}$.

Définition 6.3.2. Soit $n \geq 0$ un entier. La CDGA des formes polynomiales sur le simplexe Δ^n est :

$$\Omega_{\text{PL}}^*(\Delta^n) := \frac{S(t_0, \dots, t_n, dt_0, \dots, dt_n)}{(t_0 + \dots + t_n = 1, dt_0 + \dots + dt_n = 0)}.$$

On a $|t_i| = 0$, $|dt_i| = 1$, et la différentielle est donnée par $d(t_i) = dt_i$ et $d(dt_i) = 0$.

Remarque 6.3.3. Cette CDGA est bien sûr isomorphe à $S(t_1, \dots, t_n, dt_1, \dots, dt_n)$ mais cet isomorphisme « casse » la symétrie de Δ^n . En particulier $\Omega^*(\Delta^1)$ est l'intervalle I de la Section 6.2.3.

Les simplexes Δ^n forment un objet cosimplicial Δ^\bullet dans les ensembles simpliciaux. On peut se servir de cette structure pour définir un objet simplicial (par contravariance) à partir des $\Omega_{\text{PL}}^*(\Delta^n)$:

Lemme 6.3.4. Les CDGA $\Omega_{\text{PL}}^*(\Delta^n)$ s'assemblent pour former une CDGA cosimpliciale $\Omega_{\text{PL}}^*(\Delta^\bullet)$, avec pour applications de structure :

$$d_i(t_k) = \begin{cases} t_k, & \text{si } k < i, \\ 0, & \text{si } k = i, \\ t_{k-1}, & \text{si } k > i; \end{cases} \quad s_j(t_k) = \begin{cases} t_k, & \text{si } k < i, \\ t_k + t_{k+1}, & \text{si } k = i, \\ t_{k+1}, & \text{si } k > i. \end{cases}$$

Cette CDGA cosimpliciale a plusieurs propriétés utiles, qui permettront par exemple de montrer que $\Omega_{\text{PL}}^*(X)$ a la même cohomologie que X .

Lemme 6.3.5 (Lemme de Poincaré). Pour tout $n \geq 0$, l'unité $\eta : \mathbb{Q} \rightarrow \Omega_{\text{PL}}^*(\Delta^n)$ est un quasi-isomorphisme.

Démonstration. On a un isomorphisme $\Omega_{\text{PL}}^*(\Delta^n) \cong \bigotimes_{i=1}^n S(t_i, dt_i)$. Il est clair que chaque $S(t_i, dt_i)$ est acyclique (la différentielle est telle que $d(t_i^k) = t_i^{k-1} dt_i$) donc $\Omega_{\text{PL}}^*(\Delta^n)$ est acyclique par la formule de Künneth. \square

Lemme 6.3.6. Pour tout $i \geq 0$, l'identité du \mathbb{Q} -module simplicial $\Omega^i(\Delta^\bullet)$ est homotope à l'application constante 0, c'est-à-dire qu'il existe des applications linéaires $H_n : \Omega^i(\Delta^n) \rightarrow \Omega^i(\Delta^{n+1})$ vérifiant $d_0 H_n = \text{id}$, $d_1 H_0 = 0$, $d_{j+1} H_n = H_{n-1} d_j$ pour $n > 0$, et $s_{j+1} s_j = H_n s_j$. En particulier, la réalisation géométrique de $\Omega^i(\Delta^\bullet)$ est contractile.

Démonstration. Soit $n \geq 0$ et N un entier tel que $N > 2i$. On peut alors définir :

$$H_n : \Omega^i(\Delta^n) \rightarrow \Omega^i(\Delta^{n+1}),$$

$$P \cdot dt_{m_1} \dots dt_{m_i} \mapsto P \cdot t_{n+1}^N \cdot \frac{dt_{m_1} t_{n+1} - dt_{n+1} \cdot t_{m_1}}{t_{n+1}^2} \dots \frac{dt_{m_i} t_{n+1} - dt_{n+1} \cdot t_{m_i}}{t_{n+1}^2}.$$

On vérifie alors manuellement les équations voulues (voir [Fre17, Proposition 7.1.3] pour les détails). \square

Lemme 6.3.7 (Extensibilité). *Soit $n \geq 1$ un entier et $I \subset [n]$ un sous-ensemble. Pour toute famille $\{\omega_i \in \Omega_{\text{PL}}^d(\Delta^{n-1})\}_{i \in I}$ vérifiant les équations $d_i \omega_j = d_{j-1} \omega_i$ pour $i < j \in I$, il existe $\omega \in \Omega_{\text{PL}}^d(\Delta^n)$ telle que $d_i \omega = \omega_i$.*

Démonstration. On suppose données des formes ω_i comme dans l'énoncé. On pose $\zeta_{-1} = 0 \in \Omega_{\text{PL}}^d(\Delta^n)$ et on va construire par récurrence des formes $\zeta_r \in \Omega_{\text{PL}}^d(\Delta^n)$ vérifiant $d_i \zeta_r = \omega_i$ pour $I \ni i \leq r$. Supposons ζ_{r-1} construit et vérifiant l'hypothèse précédente. Si $r \notin I$, on pose simplement $\zeta_r = \zeta_{r-1}$. Sinon, on étend la CDGA $\Omega^*(\Delta^n)$ en

$$B := \left(\Omega^*(\Delta^n) \left[\frac{1}{1-t_r} \right], d \left(\frac{1}{1-t_r} \right) = \frac{dt_r}{(1-t_r)^2} \right).$$

On définit $\varphi : \Omega^*(\Delta^{n-1}) \rightarrow B$ par

$$\varphi(t_i) = \begin{cases} \frac{t_i}{1-t_r}, & \text{si } i < r, \\ \frac{t_{i+1}}{1-t_r}, & \text{si } i \geq r; \end{cases} \quad \varphi(dt_i) = d(\varphi(t_i)).$$

On peut également étendre la face d_r en $d_r : B \rightarrow \Omega_{\text{PL}}^*(\Delta^{n-1})$ en posant $d_r(\frac{1}{1-t_r}) = 1$. On peut alors écrire

$$\varphi(\omega_r - d_r \zeta_{r-1}) = \frac{1}{(1-t_r)^N} \psi \text{ pour } \psi \in \Omega_{\text{PL}}^d(\Delta^n).$$

On pose alors $\zeta_r = \zeta_{r-1} + \psi$ et on vérifie que ζ_r vérifie l'hypothèse de récurrence (voir [FHT01, Lemma 10.7] pour les détails). \square

On peut maintenant définir les formes polynomiales par morceaux sur un ensemble simplicial.

Définition 6.3.8. Le foncteur des formes polynomiales par morceaux est :

$$\Omega_{\text{PL}}^* : s\text{Set} \rightarrow \text{CDGA}^{\text{op}}, \quad X \mapsto \text{Hom}_{s\text{Set}}(X_\bullet, \Omega_{\text{PL}}^*(\Delta^\bullet)).$$

Si X est un espace topologique, on définit aussi $\Omega_{\text{PL}}^*(X) = \Omega_{\text{PL}}^*(S_\bullet(X))$.

Concrètement, un élément $\omega \in \Omega_{\text{PL}}^i(X)$ est une collection $\{\omega_\sigma \in \Omega^i(\Delta^n)\}_{\sigma \in X_n, n \geq 0}$ de formes polynomiales sur les simplexes de X vérifiant $d_i \omega_\sigma = \omega_{d_i \sigma}$ et $s_j \omega_\sigma \omega_{s_j \sigma}$. Le produit et la différentielle sont définis termes à termes : $(d\omega)_\sigma = d(\omega_\sigma)$ et $(\alpha\beta)_\sigma = \alpha_\sigma \beta_\sigma$.

Remarque 6.3.9. Grâce au lemme de Yoneda, on a bien que le $\Omega_{\text{PL}}^*(\Delta^n)$ de la Définition 6.3.2 correspond bien à celui de la Définition 6.3.8.

Avec un peu d'*abstract nonsense*, on trouve facilement un adjoint à droite pour Ω_{PL}^* .

Lemme 6.3.10 (Exercice). *Le foncteur $\Omega_{\text{PL}}^* : s\text{Set} \rightarrow \text{CDGA}^{\text{op}}$ admet un adjoint à droite, appelé le foncteur de réalisation :*

$$\begin{aligned} \langle - \rangle : \text{CDGA}^{\text{op}} &\rightarrow s\text{Set} \\ A &\mapsto \langle A \rangle_\bullet := \text{Hom}_{\text{CDGA}}(A, \Omega_{\text{PL}}^*(\Delta^\bullet)). \end{aligned}$$

Concluons par un analogue PL du théorème de de Rham. Soit X un ensemble simplicial. On peut le linéariser degré par degré pour obtenir un espace vectoriel simplicial $\mathbb{Q}[X]$ (une base en degré n étant donné par l'ensemble X_n). On construit un complexe de chaînes à partir de $\mathbb{Q}[X]$ en posant $C_n(X) = \mathbb{Q}[X_n]$ et la différentielle est donnée par $d = \sum (-1)^i d_i$ (comparer avec N_*X dans la Section 5.4). Enfin, on peut dualiser degré par degré pour obtenir un complexe de cochaînes $C^*(X)$. Le cup produit définit une structure de DGA sur $C^*(X)$ (qui n'est pas commutative en général).

Théorème 6.3.11 (Sullivan). *Il existe un quasi-isomorphisme naturel de complexes de cochaînes, qui induit un isomorphisme de CDGA en cohomologie :*

$$\int : \Omega_{\text{PL}}^*(X) \rightarrow C^*(X).$$

Pour un élément $\omega = \{\omega_\sigma \in \Omega^n(\Delta^d)\}_{\sigma \in X_d}$ et $\sigma \in X_n$, on écrit $\omega_\sigma = f_\sigma dt_1 \dots dt_n$, alors

$$\int \omega : X_n \rightarrow \mathbb{Q}, \quad x \mapsto \int_{\Delta^n} f_n dt_1 \dots dt_n.$$

De plus, l'isomorphisme en cohomologie est induit par un zigzag de quasi-isomorphismes naturels de DGA entre Ω_{PL}^* et C^* .

Démonstration. Le fait que \int est bien défini résulte de vérifications manuelles. Le fait que ce soit un quasi-isomorphisme découle du lemme de Poincaré et de la formule de Stokes. Pour le dernier point, on utilise le zigzag de quasi-isomorphismes de CDGA simpliciales $C^*(\Delta^\bullet) \rightarrow C^*(\Delta^\bullet) \otimes \Omega_{\text{PL}}^*(\Delta^n) \leftarrow \Omega_{\text{PL}}^*(\Delta^\bullet)$. On s'en sert pour définir des foncteurs sur $s\text{Set}$ définis de manière analogues à Ω_{PL}^* et on remarque que $C^*(X) \cong \text{Hom}_{s\text{Set}}(X, C^*(\Delta^\bullet))$. L'extensibilité de $\Omega_{\text{PL}}^*(\Delta^\bullet)$ et $C^*(\Delta^\bullet)$ permet de montrer que $\text{Hom}_{s\text{Set}}(X, -)$ préserve les quasi-isomorphismes de CDGA simpliciales et on peut conclure. \square

Proposition 6.3.12. *L'adjonction $\Omega_{\text{PL}}^* : s\text{Set} \rightleftarrows \text{CDGA}^{\text{op}} : \langle - \rangle$ du Lemme 6.3.10 est une adjonction de Quillen.*

Démonstration. On rappelle que les cofibrations de CDGA^{op} sont les opposés des fibrations de Kan. Montrons que Ω_{PL}^* préserve les cofibrations. Comme il préserve les équivalences faibles grâce au Théorème 6.3.11, il préservera alors les cofibrations acycliques, ce qui permettra de conclure.

Soit $K \hookrightarrow L$ une cofibration d'ensemble simpliciaux. Montrons que l'application de restriction $\Omega_{\text{PL}}^*(L) \rightarrow \Omega_{\text{PL}}^*(K)$ est une fibration de CDGA, c.-à-d. une surjection. On a vu que toute inclusion est un rétract d'un complexe \mathcal{I} -cellulaire où $\mathcal{I} = \{\partial\Delta^n \rightarrow \Delta^n\}$. Les surjections sont stables par rétracts, donc il suffit de montrer qu'une inclusion du type $K \subset K \cup_{\partial\Delta^n} \Delta^n$ s'envoie sur une surjection par Ω_{PL}^* . Or, Ω_{PL}^* étant un adjoint à droite, il préserve les pushouts (qui sont en réalité des pullbacks dans CDGA^{op}), donc $\Omega_{\text{PL}}^*(K \cup_{\partial\Delta^n} \Delta^n) \cong \Omega_{\text{PL}}^*(K) \times_{\Omega_{\text{PL}}^*(\partial\Delta^n)} \Omega_{\text{PL}}^*(\Delta^n)$. Le Lemme 6.3.7 entraîne que les restrictions $\Omega_{\text{PL}}^*(\Delta^n) \rightarrow \Omega_{\text{PL}}^*(\partial\Delta^n)$ est surjective, et le pullback d'une surjection est une surjection, ce qui conclut la preuve. \square

On peut aussi définir un analogue de l'espace des fonctions de la Définition 5.3.2.

Définition 6.3.13. Soit A, B deux CDGA. On définit l'espace des morphismes par :

$$\mathrm{Map}_\bullet(A, B) = \mathrm{Hom}_{\mathrm{CDGA}}(A \otimes \Omega_{\mathrm{PL}}^*(\Delta^\bullet), B).$$

En particulier, $\mathrm{Map}_0(A, B) = \mathrm{Hom}_{\mathrm{CDGA}}(A \otimes \Omega_{\mathrm{PL}}^*(\Delta^0), B) = \mathrm{Hom}_{\mathrm{CDGA}}(A, B)$.

Proposition 6.3.14. Soit $f, g : A \rightarrow B$ deux morphismes de CDGA. Alors f est homotope de Sullivan à g si et seulement si f et g sont dans la même composante de $\mathrm{Map}_\bullet(A, B)$.

Démonstration. C'est immédiat vue la définition de l'homotopie de Sullivan (où l'on remarque que $I = \Omega_{\mathrm{PL}}^*(\Delta^1)$). \square

6.3.2 L'équivalence

On arrive au théorème-clé de ce chapitre.

Proposition 6.3.15. L'adjonction $\Omega_{\mathrm{PL}}^* : \mathbf{sSet} \rightleftarrows \mathrm{CDGA}^{\mathrm{op}} : \langle - \rangle$ se restreint en une adjonction de Quillen $\mathbf{sSet}_{\geq 2}^{\mathbb{Q}} \rightleftarrows \mathrm{CDGA}_{\geq 2}^{\mathrm{op}}$.

Démonstration. L'adjonction passe aux catégories 1-réduites (resp. 1-connexes) : il est clair que si X est 1-réduit alors $\Omega_{\mathrm{PL}}^*(X)$ est 1-connexe, et si A est 1-connexe alors $\langle A \rangle$ est 1-réduit. La compatibilité de l'adjonction avec la localisation de Bousfield $(-)^{\mathbb{Q}}$ est identique avec la preuve de la Proposition 6.3.12 : les cofibrations sont les mêmes, et les équivalences rationnelles induisent par définition un quasi-isomorphisme sur $C^*(-)$. \square

Théorème 6.3.16. L'adjonction précédente induit une équivalence entre

- $\mathrm{Ho}(\mathbf{sSet}_{\geq 2}^{\mathbb{Q}})_{\mathrm{tf}}$: la sous-catégorie de la catégorie homotopique de $\mathrm{Ho}(\mathbf{sSet}_{\geq 2}^{\mathbb{Q}})$ des espaces 1-réduits dont l'homologie est de type fini⁶ ; et
- $\mathrm{Ho}(\mathrm{CDGA}_{\geq 2}^{\mathrm{op}})_{\mathrm{tf}}$: la sous-catégorie de la catégorie homotopique de $\mathrm{CDGA}_{\geq 2}^{\mathrm{op}}$ des CDGA 1-connexes de type fini.

Remarque 6.3.17. On ne peut pas vraiment parler d'une équivalence de Quillen entre $\mathbf{sSet}_{\geq 2, \mathrm{tf}}^{\mathbb{Q}}$ et $\mathrm{CDGA}_{\mathrm{tf}}^{\mathrm{op}}$: ces catégories ne sont ni complètes ni cocomplètes.

Remarque 6.3.18. On peut remplacer les ensembles simpliciaux par des espaces topologiques (cf. Section 5.3).

Pour démontrer le théorème, on va s'intéresser à l'unité et à la counité de l'adjonction dérivée $\mathbb{L}\Omega_{\mathrm{PL}}^* \dashv \mathbb{R}\langle - \rangle$. On doit en particulier s'intéresser au comportement de Ω_{PL}^* sur les CDGA cofibrantes.

6. C'est-à-dire de dimension finie en chaque degré

Lemme 6.3.19. *Les objets cofibrants de $\text{CDGA}_{\geq 2}$ sont les algèbres minimales.*

Démonstration. On a vu que les objets cofibrants de CDGA sont les rétracts d'algèbres de Sullivan (Proposition 6.2.34). Dans $\text{CDGA}_{\geq 2}$, une algèbre de Sullivan est automatiquement minimale. De plus, tout rétract d'une algèbre de Sullivan connexe est encore une algèbre de Sullivan. \square

Lemme 6.3.20. *Soit $A = (S(V), d)$ une CDGA minimale 1-connexe. Alors pour tout $n \geq 2$, il existe un accouplement non-dégénéré :*

$$\pi_n(\langle A \rangle) \times V^n \rightarrow \mathbb{Q}$$

qui induit, si V^n est de dimension finie, un isomorphisme naturel⁷ en A :

$$V^n \cong \text{Hom}_{\mathbb{Q}}(\pi_n(\langle A \rangle), \mathbb{Q}).$$

Esquisse de démonstration (voir [FHT01, Theorem 15.11] pour plus de détails). Pour simplifier les notations, on pose $X := \langle A \rangle$ dans la suite. Définissons d'abord l'accouplement. Comme X est simplement connexe, on a $\pi_n(X) \cong \text{Hom}_{\text{Ho}(\text{sSet}_{\geq 2})}(S^n, X)$ où $S^n = \partial \Delta^{n+1}$. La classe d'homotopie rationnelle de $\gamma \in \pi_n(X)$ correspond donc à un élément (par adjonction) de $\text{Hom}_{\text{Ho}(\text{CDGA})}(A, \Omega_{\text{PL}}^*(S^n))$. On vérifie (Exemple 6.4.5) que $\Omega_{\text{PL}}^*(S^n) \simeq H^*(S^n) = S(x)/(x^2)$ où $\deg x = n$. La classe γ induit donc un élément $\gamma^* \in \text{Hom}_{\text{Ho}(\text{CDGA})}(A, S(x)/(x^2))$. On définit alors l'accouplement de γ avec $v \in V^n \subset A^n$ comme le coefficient de x dans $\gamma^*(v)$. On vérifie que cela définit bien un accouplement bilinéaire qui ne dépend pas des choix de classes d'homotopie.

Cet accouplement induit une application linéaire $\varphi_n : V^n \rightarrow \text{Hom}_{\mathbb{Q}}(\pi_n(X), \mathbb{Q})$. Vérifions que c'est un isomorphisme. Soit r le plus petit entier tel que $\pi_r(X) \neq 0$. Pour $n < r$, on a $H^n(X) = 0$ par le théorème de Hurewicz, donc nécessairement $V^n = 0$ (car l'algèbre est minimale et 1-connexe) et donc φ_n est un isomorphisme. On en déduit que φ_r est aussi un isomorphisme, encore par le théorème de Hurewicz (car $\text{Hom}_{\mathbb{Q}}(\pi_r(X), \mathbb{Q}) \cong H^r(X; \mathbb{Q}) \cong V^r$).

On a donc montré que si X est un espace $(r-1)$ -connexe alors φ_n est un isomorphisme pour $n \leq r$. On peut trouver une fibration $F \rightarrow X \xrightarrow{p} K(\pi_r(X), r)$ telle que $\pi_r(p)$ est l'identité ; l'espace F est donc r -connexe. On peut donc appliquer⁸ le résultat à F et appliquer le lemme des cinq pour en déduire que φ_{r+1} est un isomorphisme. On conclut par récurrence. \square

Lemme 6.3.21. *Soit $A = (S(V), d)$ une CDGA minimale 1-connexe et type fini. Alors la counité de l'adjonction dérivée du Théorème 6.3.16 en A est un quasi-isomorphisme :*

$$A \xrightarrow{\sim} \Omega_{\text{PL}}^*(\langle A \rangle).$$

7. On utilise l'isomorphisme $(QA)^n \cong V^n$ pour définir la fonctorialité de V par rapport à A .

8. On utilise implicitement que l'on connaît les modèles minimaux des fibrations, voir Section 6.4.3. Une personne consciencieuse peut vérifier qu'il n'y a pas de boucle logique.

Démonstration. Traitons d'abord le cas où $V = V^n$ est concentré en un unique degré. Le lemme précédent nous dit que $X = \langle A \rangle$ est rationnellement équivalent à un espace d'Eilenberg–MacLane de type $K(\mathbb{Z}^{\dim V}, n)$, dont on sait par ailleurs calculer la cohomologie rationnelle (par exemple avec des suites spectrales, et en utilisant le calcul classique de la cohomologie de $S^1 = K(\mathbb{Z}, 1)$) : c'est précisément l'algèbre symétrique engendrée par $\dim V$ générateurs en degré n . Dans ce cas, on a donc bien un quasi-isomorphisme $A = (S(V^n), 0) \rightarrow \Omega_{\text{PL}}^*(\langle A \rangle)$.

Pour le cas général, on filtre V en posant $V^{<n} = \bigoplus_{i < n} V^i$. Par minimalité, la différentielle de A se restreint à $S(V^{<n})$, et le quotient $S(V^{<n+1})/(S(V^{<n}))$ est isomorphe à $S(V^n)$ avec une différentielle nulle. Comme $V^{<2} = 0$, on peut appliquer le résultat du paragraphe précédent pour montrer que le lemme est vrai pour $(S(V^{<3}), d)$. On a des diagrammes commutatifs :

$$\begin{array}{ccccc} (S(V^{<n}), d) & \hookrightarrow & (S(V^{<n+1}), d) & \twoheadrightarrow & (S(V^n), 0) \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ \Omega_{\text{PL}}^*(\langle S(V^{<n}), d \rangle) & \longrightarrow & \Omega_{\text{PL}}^*(\langle S(V^{<n+1}), d \rangle) & \longrightarrow & \Omega_{\text{PL}}^*(\langle S(V^n), 0 \rangle) \end{array}$$

Par récurrence, le lemme est vrai pour la CDGA à gauche, et on a montré dans le paragraphe précédente qu'il est vrai pour celle de droite. Par le lemme des cinq, il est donc vrai pour celle du milieu. On conclut en passant à la colimite $A = \text{colim}_n (S(V^{<n}), d)$. \square

Lemme 6.3.22. *Soit X un ensemble simplicial fibrant 1-réduit. Alors l'unité de l'adjonction dérivée du Théorème 6.3.16 en X est une équivalence rationnelle :*

$$X \xrightarrow{\sim_{\mathbb{Q}}} \langle \Omega_{\text{PL}}^*(X) \rangle.$$

Démonstration. Par définition, on doit montrer que le morphisme de DGA suivant est un quasi-isomorphisme :

$$C^*(\langle \Omega_{\text{PL}}^*(X) \rangle) \rightarrow C^*(X).$$

Grâce au Théorème 6.3.11, il suffit en fait de montrer que le morphisme suivant est un quasi-isomorphisme :

$$\Omega_{\text{PL}}^*(\langle \Omega_{\text{PL}}^*(X) \rangle) \rightarrow \Omega_{\text{PL}}^*(X).$$

Choisissons un remplacement cofibrant (donc minimal) $A = (S(V), d) \xrightarrow{\sim} \Omega_{\text{PL}}^*(X)$. On obtient alors un diagramme commutatif :

$$\begin{array}{ccc} \Omega_{\text{PL}}^*(\langle \Omega_{\text{PL}}^*(X) \rangle) & \xrightarrow{\quad} & \Omega_{\text{PL}}^*(X) \\ & \nwarrow \sim \quad \nearrow f & \\ & A & \end{array}$$

On déduit alors du lemme précédent que f est un quasi-isomorphisme. \square

Remarque 6.3.23. On peut montrer que $\langle A \rangle$ est un espace rationnel pour toute CDGA A . On obtient donc que la rationalisation $X_{\mathbb{Q}}$ d'un ensemble simplicial fibrant 1-réduit est $\langle \Omega_{\text{PL}}^*(X) \rangle$.

Démonstration du Théorème 6.3.16. On vient de démontrer que l'unité et la counité de l'adjonction entre les catégories homotopiques correspondantes sont des isomorphismes (c.-à-d. respectivement des quasi-isomorphismes et des équivalences rationnelles). \square

6.4 Applications

6.4.1 Modèles

Proposition 6.4.1. *Les classes d'équivalence faible d'ensembles simpliciaux 1-réduits de type fini correspondent aux classes d'isomorphismes de CDGA minimales 1-connexes de type fini.*

Démonstration. Cela découle directement du Théorème 6.3.16 et de la description des CDGA cofibrantes dans $\text{CDGA}_{\geq 2}$ (Lemme 6.3.19). \square

Définition 6.4.2. Soit X un ensemble simplicial 1-réduit. Un *modèle (de Sullivan)* de X est une CDGA 1-connexe quasi-isomorphe à $\Omega_{\text{PL}}^*(X)$. Un *modèle minimal* de X est un modèle qui est une CDGA minimale. Si Y est un espace topologique, un modèle (minimal) de Y est un modèle (minimal) de $S_{\bullet}(Y)$.

Corollaire 6.4.3. *Tout ensemble simplicial 1-réduit de type fini admet un unique modèle minimal de type fini à isomorphisme près.*

Ce corollaire est fondamental : le type d'homotopie rationnel d'un espace simplement connexe de type fini est donc entièrement déterminé par une donnée purement algébrique : une CDGA minimale 1-connexe de type fini. On peut « tout » calculer au sujet de ce type d'homotopie rationnel de manière purement combinatoire (si tant est que l'on arrive à déterminer un modèle minimal, ce qui est loin d'être trivial en général.) Par exemple :

Corollaire 6.4.4. *Soit X un ensemble simplicial 1-réduit de type fini et $A = (S(V), d)$ son modèle minimal.*

- On a un isomorphisme d'algèbres graduées commutatives $H^*(X; \mathbb{Q}) \cong H^*(A)$.
- Pour tout $n \geq 2$, on a des isomorphismes d'espaces vectoriels $V^n \cong \text{Hom}(\pi_n(X), \mathbb{Q})$.
- Le crochet de Whitehead $\pi_{n+1}(X) \times \pi_{m+1}(X) \rightarrow \pi_{n+m+1}(X)$ est dual (sous l'isomorphisme précédent) de la partie quadratique de la différentielle, $d_2 : V^{n+m+1} \rightarrow V^{n+1} \otimes V^{m+1} \subset S^{(2)}(V)^{n+m+2}$.

Exemple 6.4.5 (Sphères). Soit $n \geq 2$. Considérons la sphère $S^n = \Delta^n / \partial \Delta^n$. Sa cohomologie rationnelle est $A = H^*(S^n) = S(x)/(x^2)$ où $\deg x = n$.

- Si $n = 2k + 1$ est impair, alors $H^*(S^{2k+1})$ est libre (donc minimale) sur le générateur x . Il existe un quasi-isomorphisme direct $H^*(S^{2k+1}) \rightarrow \Omega_{\text{PL}}^*(S^{2k+1})$, obtenu en envoyant x sur n'importe quel forme volume. On obtient ainsi que S^{2k+1} a pour modèle minimal $S(x)$. On trouve donc immédiatement que $\pi_{2k+1}(S^{2k+1}) = \mathbb{Q}$ et $\pi_i(S^{2k+1}) = 0$ pour $2 \leq i \neq 2k + 1$.
- Si $n = 2k$ est pair, alors $H^*(S^{2k})$ n'est pas libre. Un modèle minimal est donné par $M = (S(x, y), dy = x^2)$ (où $\deg y = 4k - 1$). Il y a un quasi-isomorphisme $M \rightarrow \Omega_{\text{PL}}^*(S^{2k})$, obtenu en envoyant x sur une forme volume et y sur une forme vérifiant $dy = x^2$ (qui existe nécessairement car $[x^2] = 0$ en cohomologie). On obtient alors que $H^*(S^{2k})$ est bien un modèle de S^{2k} . On peut également calculer les groupes d'homotopie rationnels : comme il y a deux générateurs dans le modèle minimal, $\pi_{2k}(S^{2k}) = \pi_{4k-1}(S^{2k}) = \mathbb{Q}$ et $\pi_i(S^{2k}) = 0$ pour $2 \leq i \neq 2k, 4k - 1$.

On retrouve ainsi un théorème de Serre sur les groupes d'homotopie des sphères.

Exemple 6.4.6. Consider l'espace projectif complexe \mathbb{CP}^n (avec $n \geq 1$). Sa cohomologie est $H^*(\mathbb{CP}^n) = S(x)/(x^{n+1})$ où $\deg x = 2$. Comme précédemment, on trouve comme modèle minimal $A = (S(x, y), dy = x^{n+1})$.

Exemple 6.4.7. Soit A le modèle minimal de X et B le modèle minimal de Y . Alors le produit $X \times Y$ a pour modèle minimal $A \otimes B$. Le bouquet $X \vee Y$ a pour modèle minimal $A \oplus_{\mathbb{Q}} B$, le quotient de $A \oplus B$ par la relation $(1, 0) = (0, 1)$ avec comme multiplication $a \cdot b = 0$ si $a \in \bar{A}$ et $b \in \bar{B}$.

Exemple 6.4.8. Soit G un groupe de Lie de dimension finie. On peut montrer que le modèle minimal de G est une algèbre libre sur des générateurs de degré impair. En particulier, tous les groupes d'homotopie de degré pair d'un groupe de Lie sont de torsion.

6.4.2 Formalité

Les sphères, les espaces projectifs complexes et les groupes de Lie font partie d'une classe très particulière d'espace : leur cohomologie est un modèle (non nécessairement minimal) pour leur type d'homotopie rationnel.

Définition 6.4.9. Un ensemble simplicial X (1-réduit de type fini) est *formel* si sa cohomologie rationnelle $H^*(X; \mathbb{Q})$ est quasi-isomorphe comme CDGA à $\Omega_{\text{PL}}^*(X)$.

Remarque 6.4.10. Sur un corps, un complexe de cochaînes est toujours quasi-isomorphe à sa cohomologie. Dans la définition précédente, il est essentiel de prendre en compte la structure de CDGA.

Exemple 6.4.11. Les sphères, les espaces projectifs complexes et les groupes de Lie sont formels.

Exemple 6.4.12. La suspension ΣX d'un espace quelconque est formelle.

Exemple 6.4.13. Le produit et le bouquet de deux espaces formels sont formels.

Exemple 6.4.14 ([DGMS75]). Une variété de Kähler⁹ compacte est formelle.

Exemple 6.4.15 ([FOT08, Proposition 2.99]). Soit X un espace $(p-1)$ -connexe ($p \geq 2$) de dimension $\leq 3p-2$. Alors X est formel.

Exemple 6.4.16 ([Hes07, p.13]). On peut trouver un exemple d'espace non-formel de la manière suivante. Considérons

$$A = (S(x_3, y_3, z_5), dz = xy).$$

On calcule facilement que $H^0(A) = \mathbb{Q}1$, $H^3(A) = \mathbb{Q}x \oplus \mathbb{Q}y$, $H^8(A) = \mathbb{Q}xz \oplus \mathbb{Q}yz$ et $H^{11}(A) = \mathbb{Q}xyz$ (et tous les autres groupes de cohomologie sont nuls). Comme A est minimale (donc cofibrante), s'il existait un zigzag de quasi-isomorphismes entre A et $H^*(A)$, alors il existerait un quasi-isomorphisme direct $f : A \rightarrow H^*(A)$. Pour des raisons de degré, on aurait nécessairement $f(z) = 0$, donc $f(xyz) = 0$. Le morphisme f ne peut donc pas être un quasi-isomorphisme.

Exemple 6.4.17 ([FOT08]). On peut trouver une variété non-formelle de la manière suivante. Soit $q : S^2 \times S^2 \rightarrow S^4$ l'application qui écrase $S^2 \vee S^2$ sur un point. Soit $M = S^7 \times_{S^4} (S^2 \times S^2)$, où $S^7 \rightarrow S^4$ est la fibration de Hopf. Le modèle minimal de M est alors donné par

$$(S(a_2, b_2, u_3, v_3, t_3), da = 0, db = 0, du = a^2, dv = b^2, dt = ab).$$

On peut vérifier que cette CDGA n'est pas formelle.

6.4.3 Fibrations et modèles

Les modèles de Sullivan sont particulièrement adaptés pour étudier les fibrations :

Théorème 6.4.18 ([FHT01, Theorem 15.3]). Soit $p : E \rightarrow B$ une fibration de fibre F , avec E et B simplement connexes de types finis. Supposons de plus que F est de type fini. Soit $A = (S(V), d)$ le modèle minimal de B et $i : (S(V), d) \rightarrow (S(V \oplus W), D)$ le modèle minimal de p . Alors le quotient $(S(W), \bar{d}) = (S(V \oplus W), D) / (S^{(\geq 1)}(V) \otimes S(W))$ est le modèle minimal de F .

On utilise souvent ce théorème « à l'envers » : si on connaît le modèle minimal $(S(V), d)$ de B et le modèle minimal $(S(W), \bar{d})$ de F , on sait que le modèle minimal de E sera du type $(S(V \oplus W), D)$ où D étend d et induit \bar{d} sur le quotient.

Exemple 6.4.19 (Espace des chemins). Soit (X, x_0) un espace pointé (simplement connexe de type fini). On définit son espace des chemins, muni de la topologie compacte-ouverte :

$$PX := \{\gamma : [0, 1] \rightarrow X \mid \gamma(0) = x_0\}.$$

9. C'est une variété symplectique (X, ω) munie d'une structure quasi-complexe intégrale J telle que $(u, v) \mapsto \omega(u, Jv)$ est une forme bilinéaire symétrique définie positive sur chaque espace tangent $T_x X$.

Cet espace est contractible, une homotopie étant donnée par $H(\gamma, t) : s \mapsto \gamma(ts)$. Il y a une fibration $\pi : PX \rightarrow X$ donnée par $\pi(\gamma) = \gamma(1)$, et la fibre $\pi^{-1}(x_0)$ n'est autre que l'espace des lacets ΩX . On obtient donc une fibration $\Omega X \rightarrow PX \rightarrow X$.

Soit $(S(V), d)$ le modèle minimal de X . Comme PX est contractile, on trouve que le modèle minimal de π est $(S(V \oplus V[-1]), D)$ où $V[-1]$ est une copie de V décalée en degré de 1 (dont on notera les éléments \bar{v} avec $\deg \bar{v} = \deg v + 1$), avec comme différentielle $D(\bar{v}) = v \pm \bar{d}v$. Le modèle minimal de ΩX est donc donné par $(S(V[-1]), \bar{d} = 0)$: comme d est décomposable, $\bar{d}v$ s'annule dans le quotient. On « retrouve » ainsi le fait que les groupes d'homotopie de ΩX sont les mêmes que ceux de X , décalés en degré (ce qui est évident par la suite exacte longue de la fibration). On remarque de plus que ΩX est formel (ce qui peut se déduire du fait que c'est un H-espace¹⁰).

Concluons par un exemple intéressant d'application de la théorie de Sullivan. (Nous n'énoncerons pas le théorème en entier car cela ferait appel à certaines notions que nous n'avons pas vues.)

Définition 6.4.20. Soit X un espace simplement connexe de type fini. Il est dit *rationnellement elliptique* si $\sum_{k \geq 2} \text{rang } \pi_k(X) < +\infty$, et *rationnellement hyperbolique* sinon.

Définition 6.4.21. Soit X un espace simplement connexe de type fini. Si la cohomologie rationnelle de X est bornée, on appelle sa *dimension* l'entier maximal n tel que $H^n(X; \mathbb{Q}) \neq 0$.

Théorème 6.4.22 (Dichotomie, cas hyperbolique [FHT01]). Soit X un espace rationnellement hyperbolique de dimension n . Alors :

1. La série $\sum_{k \leq m} \text{rang } \pi_k(X)$ a une croissance exponentielle : il existe des constantes $A > 1$ et $C > 0$ telles que pour $m \gg 0$,

$$\sum_{k \leq m} \text{rang } \pi_k(X) \geq CA^m.$$

2. La suite des nombres de Betti de ΩX a une croissance exponentielle.
3. Il n'y a pas de « gros trou » dans les groupes d'homotopie rationnelle : pour tout entier q , il existe un entier $q < p < q + n$ tel que $\text{rang } \pi_p(X) > 0$.
4. (etc, voir [FHT01]).

Pour le cas elliptique, on définit la caractéristique d'Euler homotopique :

$$\chi_\pi(X) = \sum_{k \geq 0} (-1)^k \text{rang } \pi_k(X).$$

Théorème 6.4.23 (Dichotomie, cas elliptique [FHT01]). Soit X un espace rationnellement elliptique de dimension n . Alors :

10. Un H-espace est un espace topologique X muni d'une application $\mu : X \times X \rightarrow X$ et d'un élément $e \in X$ tels que $\mu(e, -)$ et $\mu(-, e)$ sont homotopes à l'identité.

1. Les groupes d'homotopie $\pi_k(X)$ sont finis pour $k \geq 2n$.
2. La caractéristique d'Euler homotopique $\chi_\pi(X)$ est négative (donc $\text{rang } \pi_{\text{pair}}(X) \leq \text{rang } \pi_{\text{impair}}(X)$) tandis que la caractéristique d'Euler $\chi(X)$ est positive.
3. La cohomologie rationnelle de X est à dualité de Poincaré.
4. (etc, voir [FHT01]).

Exemple 6.4.24. Les tores $T^n = (S^1)^n$, les sphères S^n , les espaces projectifs complexes \mathbb{CP}^n et les groupes de Lie compacts sont rationnellement elliptiques. La somme connexe de k copies de $S^3 \times S^2$ est rationnellement hyperbolique pour $k \geq 2$ (car sa caractéristique est strictement négative).

6.4.4 Type d'homotopie réel

Dans certains cas, le type d'homotopie rationnel d'un espace X est encore un invariant trop « fort ». On ne peut parfois pas se passer des nombres réels, par exemple quand on veut calculer des intégrales sur une variété. Dans cette section, on adapte la notion de modèle rationnel en la notion de « modèle réel ». Comme les deux corps \mathbb{Q} et \mathbb{R} interviennent, on prendra garde à mettre des indices $(-)_\mathbb{Q}$ ou $(-)_\mathbb{R}$ pour indiquer dans quelle catégorie les objets ou morphismes se trouvent.

Définition 6.4.25. Un *modèle réel* d'un ensemble simplicial 1-réduit de type fini est une CDGA 1-connexe quasi-isomorphe à $\Omega_{\text{PL}}^*(X) \otimes_{\mathbb{Q}} \mathbb{R}$. Un *modèle réel minimal* est un modèle réel qui est une CDGA minimale.

Proposition 6.4.26. Si A est un modèle rationnel de X , alors c'est un modèle réel de X .

Démonstration. Le \mathbb{Q} -module \mathbb{R} est plat, car il est libre (comme tous les \mathbb{Q} -espaces vectoriels, en supposant l'axiome du choix). Le foncteur $- \otimes_{\mathbb{Q}} \mathbb{R}$ est donc exact. Si on a un quasi isomorphisme $A \xleftarrow{\sim_{\mathbb{Q}}} \cdot \xrightarrow{\sim_{\mathbb{Q}}} \Omega_{\text{PL}}^*(X)$, alors $A \otimes_{\mathbb{Q}} \mathbb{R} \xleftarrow{\sim_{\mathbb{R}}} \cdot \otimes_{\mathbb{Q}} \mathbb{R} \xrightarrow{\sim_{\mathbb{R}}} \Omega_{\text{PL}}^*(X) \otimes_{\mathbb{Q}} \mathbb{R}$ est un quasi-isomorphisme. \square

Exemple 6.4.27. La réciproque est fausse. Pour un contre-exemple, il suffit d'exhiber deux CDGA 1-connexes à coefficients réels qui sont quasi-isomorphes sur \mathbb{R} mais pas sur \mathbb{Q} . Un exemple est donné par [FOT08, Exemple 2.38]. Soit $a > 0$ un nombre rationnel. On définit :

$$A_a := (S(e_2, x_4, y_7, z_9), d_a),$$

où la différentielle est donnée par :

$$d_a(e) = 0, d_a(x) = 0, d_a(y) = x^2 + ae^4, d_a(z) = e^5.$$

Alors $A_a \simeq_{\mathbb{Q}} A_{a'} \iff a/a'$ est le carré d'un nombre rationnel :

- Si $a/a' = \tau^2$ où $\tau \in \mathbb{Q}$, alors on définit un quasi-isomorphisme $\varphi : A_a \rightarrow A_{a'}$ par $\varphi(e) = e$, $\varphi(x) = \tau x$, $\varphi(y) = \tau^2 y$ et $\varphi(z) = z$.

- Réciproquement, si A_a et $A_{a'}$ sont quasi-isomorphes, alors comme elles sont minimales il existe un quasi-isomorphisme direct $\varphi : A_a \rightarrow A_{a'}$. En raisonnant sur les coefficients de φ on en déduit que a/a' est un carré (exercice).

En réutilisant la preuve du premier point et le fait que tout nombre rationnel est le carré d'un nombre réel, on en déduit que A_a et $A_{a'}$ sont toujours quasi-isomorphes sur \mathbb{R} . Donc par exemple $A_{\sqrt{2}}$ et A_1 sont quasi-isomorphes sur \mathbb{R} mais pas sur \mathbb{Q} .

Il existe cependant une réciproque partielle de la proposition. On rappelle qu'un espace X est formel (sur \mathbb{Q}) si $\Omega_{\text{PL}}^*(X) \simeq_{\mathbb{Q}} H^*(X; \mathbb{Q})$. De façon analogue, un espace est dit formel sur \mathbb{R} si $\Omega_{\text{PL}}^*(X) \otimes_{\mathbb{Q}} \mathbb{R} \simeq_{\mathbb{R}} H^*(X; \mathbb{R})$.

Théorème 6.4.28 ([FOT08, Proposition 2.101]). *Un ensemble simplicial 1-réduit de type fini est formel sur \mathbb{Q} si et seulement si il est formel sur \mathbb{R} .*

Idée. La démonstration fait appel à la théorie de l'obstruction. Soit X est un espace comme dans l'énoncé. Pour un corps \mathbb{K} , il existe un complexe de chaînes $D_X^{\mathbb{K}}$ et une suite d'obstructions $d_2, d_3, \dots \in H_*(D_X^{\mathbb{K}})$ telles que X est formel si et seulement si $d_2 = d_3 = \dots = 0$. On peut montrer que le complexe $D_X^{\mathbb{R}}$ est obtenu comme $D_X^{\mathbb{Q}} \otimes_{\mathbb{Q}} \mathbb{R}$ et que les obstructions sur \mathbb{R} proviennent des obstructions sur \mathbb{Q} ($d_i^{\mathbb{R}} = d_i^{\mathbb{Q}} \otimes 1$). On en déduit qu'elles sont nulles sur \mathbb{Q} si et seulement si elles sont nulles sur \mathbb{R} . \square

Quand un espace est une variété, on peut utiliser les outils de la géométrie différentielle pour étudier son type d'homotopie réel :

Théorème 6.4.29. *Soit M une variété lisse simplement connexe de type fini, et $\Omega_{\text{dR}}^*(M)$ sa CDGA des formes différentielles de de Rham. Alors toute CDGA 1-connexe de type fini quasi-isomorphe à $\Omega_{\text{dR}}^*(M)$ est un modèle réel de M .*

Idée. Cela découle essentiellement du théorème de de Rham : $\Omega_{\text{dR}}^*(M) \simeq_{\mathbb{R}} C^*(X; \mathbb{R})$ (pour être précis, il faudrait réutiliser les propriétés de Ω_{PL}^* vues en Section 6.3.2). \square

6.5 Modèles de Quillen

Il existe une autre manière d'abord la théorie de l'homotopie rationnelle due à Quillen [Qui69] dont nous allons brièvement parler ici. Cette théorie utilise des algèbres de Lie différentielles graduées plutôt que des CDGA.

Définition 6.5.1. Une *algèbre de Lie différentielle graduée* (DGLA en anglais) est un complexe de chaînes \mathfrak{g} muni d'une application bilinéaire $[-, -] : \mathfrak{g}^{\otimes 2} \rightarrow \mathfrak{g}$ (le « crochet ») qui est antisymétrique et qui vérifie les relations de Jacobi et Leibniz :

$$\begin{aligned} [x, y] + (-1)^{\deg x \deg y} [y, x] &= 0; \\ (-1)^{\deg x \deg z} [x, [y, z]] + (-1)^{\deg x \deg y} [y, [z, x]] + (-1)^{\deg y \deg z} [z, [x, y]] &= 0; \\ d[x, y] &= [dx, y] + (-1)^{\deg x} [x, dy]. \end{aligned}$$

On note DGLA la catégorie des DGLA (graduées sur \mathbb{N}) et de leurs morphismes, et $\text{DGLA}_{\geq 1}$ la sous-catégorie pleine des DGLA \mathfrak{g} vérifiant $\mathfrak{g}_0 = 0$.

Exemple 6.5.2. Soit A une DGA. On peut définir une DGLA avec le commutateur $[a, b] = ab - \pm ba$.

Exemple 6.5.3. Soit X un ensemble simplicial. Alors on a une algèbre de Lie graduée (de différentielle nulle) donnée par $\mathfrak{g}_i = \pi_{i+1}(X)$ muni du crochet de Whitehead, que l'on peut voir comme étant le commutateur de la concaténation des lacets sur $\pi_i(\Omega X) \cong \pi_{i+1}(X)$. On définit ainsi un foncteur $\pi : s\text{Set}_{\geq 2} \rightarrow \text{DGLA}_{\geq 1}$. (À ne pas confondre avec le foncteur « groupoïde fondamental » du Chapitre 7!)

Théorème 6.5.4 (Quillen [Qui69]). *Il existe une équivalence de Quillen*

$$\lambda : s\text{Set}_{\geq 2} \rightarrow \text{DGLA}_{\geq 1}.$$

De plus pour tout $X \in s\text{Set}_{\geq 2}$, on a $\pi X \cong H_*(\lambda X)$.

Définition 6.5.5. Un modèle de Quillen d'un ensemble simplicial 1-réduit X est une DGLA quasi-isomorphe à λX .

Idée du Théorème 6.5.4. L'équivalence λ est obtenue en composant plusieurs équivalences :

$$s\text{Set}_{\geq 2} \xrightleftharpoons[\bar{W}]{G} s\text{Gp}_{\geq 1} \xrightleftharpoons[\mathbb{G}]{\widehat{\mathbb{Q}}} s\text{CHA}_{\geq 1} \xrightleftharpoons[\bar{U}]{\text{Prim}} s\text{LA}_{\geq 1} \xrightleftharpoons[\Gamma]{N} \text{DGLA}_{\geq 1}.$$

Expliquons rapidement les notations et les foncteurs.

- La catégorie $s\text{Gp}_{\geq 1}$ est celle des groupes simpliciaux réduits, c.-à-d. les objets simpliciaux dans la catégorie des groupes G_\bullet vérifiant $G_0 = 1$.
- La catégorie $s\text{CHA}_{\geq 1}$ est celles des algèbres de Hopf complètes¹¹ simpliciales réduites.
- La catégorie $s\text{LA}_{\geq 1}$ est celle des algèbres de Lie (sans différentielle ni graduation) simpliciales 1-réduites.
- Le foncteur $G : s\text{Set}_{\geq 2} \rightarrow s\text{Gp}_{\geq 1}$ (défini par Kan) est tel que si X est un ensemble simplicial, alors GX est un groupe simplicial dont la réalisation est l'espace des lacets de la réalisation de X . Son adjoint \bar{W} représente l'espace classifiant d'un groupe simplicial.
- Le foncteur $\widehat{\mathbb{Q}} : s\text{Gp}_{\geq 1} \rightarrow s\text{CHA}_{\geq 1}$ envoie un groupe simplicial G_\bullet sur la complétion de son algèbre de groupe $\widehat{\mathbb{Q}}[G_\bullet]$. Son adjoint \mathbb{G} envoie une algèbre de Hopf complète sur le groupe formé par ses éléments group-like (ceux vérifiant $\Delta x = x \otimes x$ et $\varepsilon(x) = 1$).

11. On rappelle qu'une algèbre de Hopf est un complexe de chaînes H muni d'un produit $\mu : H^{\otimes 2} \rightarrow H$, d'un « coproduit » $\Delta : H \rightarrow H^{\otimes 2}$ (Définition 6.5.6) et d'une antipode $\sigma : H \rightarrow H$ vérifiant des relations de compatibilité. Elle est complète si elle a une filtration $H = F_0 H \supset F_1 H \supset F_2 H \supset \dots$ telle que $F_1 H = \bar{H}$, l'algèbre $\text{gr } H$ est engendrée par $\text{gr}_1 H$, on a $H \cong \lim_i H/F_i H$, et le coproduit a en fait pour but le produit tensoriel complété $H \widehat{\otimes} H$.

- Le foncteur $\text{Prim} : s\text{CHA}_{\geq 1} \rightarrow s\text{LA}_{\geq 1}$ envoie une algèbre de Hopf complète sur l'algèbre de Lie formée par ses éléments primitifs (ceux vérifiant $\Delta x = x \otimes 1 + 1 \otimes x$ et $\varepsilon(x) = 0$). Son adjoint \widehat{U} est la complétion de l'algèbre enveloppante d'une algèbre de Lie (qui est une algèbre de Hopf).
- Le foncteur $N : s\text{LA}_{\geq 1} \rightarrow \text{DGLA}_{\geq 1}$ est le foncteur analogue du foncteur des chaînes normalisées de la Section 5.4. Son adjoint Γ est analogue de l'adjoint à droite dans la correspondance de Dold–Kan.

Pour démontrer le théorème de Quillen, on vérifie que chacune de ces catégories est une catégorie de modèles, et que chacune de ces adjonctions est une adjonction de Quillen. Quand on les compose toutes, on obtient une équivalence de Quillen. \square

La plupart des énoncés obtenus dans le cadre des modèles de Sullivan (Section 6.4.1) ont une contrepartie « duale » dans le cadre des modèles de Quillen. On se référera à [FHT01, Part IV]. On peut par exemple définir les DGLA libres $\mathbb{L}(V)$, les DGLA quasi-colibre $(\mathbb{L}(V), d)$, les DGLA de Sullivan et le DGLA minimales. Toute DGLA est quasi-isomorphe à une unique DGLA minimale à isomorphisme près, donc en particulier tout espace a un unique modèle de Quillen minimal.

On par exemple a vu (Section 6.4.3) que les modèles de Sullivan sont particulièrement adaptés pour étudier les fibrations. Dualement, les modèles de Quillen sont particulièrement adaptés pour étudier les attachements de cellules. Si \mathfrak{g}_X est un modèle de Quillen d'un espace X et que $Y = X \cup_{S^{n-1}} D^n$ est obtenu en rattachant une cellule à X , alors un modèle de Quillen de Y peut s'obtenir en rajoutant un générateur à \mathfrak{g}_X , alors une différentielle qui mime la manière dont la cellule est rattachée à X .

Dualité de Koszul On peut se demander quel lien existe entre les modèles de Quillen et les modèles de Sullivan. En termes « modernes », une réponse est apportée par la *dualité de Koszul entre l'opérade des algèbres commutatives et l'opérade des algèbre de Lie*. Les opérades sont des objets combinatoires qui encodent des « types d'algèbres », par exemple les algèbres associatives, les algèbres commutatives, ou les algèbres de Lie. Elles furent initialement utilisées pour étudier les espaces de lacets en topologie algébrique [BV68; May72] et ont depuis de nombreuses applications. Pour une introduction à la théorie des opérades on pourra par exemple lire [LV12] ou [Fre17, Part I(a)].

Cette dualité de Koszul des opérades fut découverte par Ginzburg et Kapranov [GK94] après des idées fondatrices de Kontsevich [Kon93]. Brièvement, cette dualité entre opérades explique certains phénomènes de dualité plus anciens en algèbre, dont nous allons donner un exemple (en rapport avec la théorie de l'homotopie rationnelle).

Définition 6.5.6. Une *cogèbre* est un complexe de chaînes C munie d'un « coproduit »

$\Delta : C \rightarrow C \otimes C$ et d'une counité $\varepsilon : C \rightarrow \mathbb{Q}$ tels que les diagrammes suivant commutent :

$$\begin{array}{ccc} C & \xrightarrow{\Delta} & C \otimes C \\ \downarrow \Delta & & \downarrow \Delta \otimes 1 \\ C \otimes C & \xrightarrow{1 \otimes \Delta} & C \otimes C \otimes C \end{array} \quad \begin{array}{ccccc} C \otimes C & \xleftarrow{\Delta} & C & \xrightarrow{\Delta} & C \otimes C \\ & \searrow 1 \otimes \varepsilon & \downarrow \text{id}_C & \swarrow \varepsilon \otimes 1 & \\ & & C & & \end{array}$$

et vérifiant le dual de la relation de Leibniz :

$$\Delta \circ d = (d \otimes 1 + 1 \otimes d) \circ \Delta.$$

Cette cogèbre est *cocommutative* (CDGC en anglais) si $\tau \circ \Delta = \Delta$ où $\tau : C \otimes C \rightarrow C \otimes C$ est défini par $\tau(x \otimes y) = (-1)^{\deg x \deg y} y \otimes x$.

Définition 6.5.7. La cogèbre cocommutative (conilpotente) *colibre* sur un complexe de cochaînes V est¹² :

$$S^c(V) := \bigoplus_{n \geq 0} (V^{\otimes n})^{\mathfrak{S}_n}.$$

Son coproduit est donné par :

$$\Delta(v_1 \dots v_n) = \sum_{p+q=n} \sum_{\sigma \in \text{Sh}(p,q)} (v_{\sigma(1)} \dots v_{\sigma(p)}) \otimes (v_{\sigma(p+1)} \dots v_{\sigma(n)}),$$

où $\text{Sh}(p, q) = \{\sigma \in \mathfrak{S}_{p+q} \mid \sigma(1) < \dots < \sigma(p) \text{ et } \sigma(p+1) < \dots < \sigma(p+q)\}$ est l'ensemble des (p, q) -battages (*shuffles* en anglais). Sa counité est donnée par la projection sur $(V^{\otimes 0})^{\mathfrak{S}_0} = \mathbb{Q}$. Sa différentielle est définie par :

$$d(v_1 \dots v_n) = \sum_{i=1}^n \pm v_1 \dots (dv_i) \dots v_n.$$

Elle est munie d'une projection canonique $\pi : S^c(V) \rightarrow V$.

Proposition 6.5.8. Soit C une cogèbre cocommutative et V un complexe de chaînes. Soit $f : C \rightarrow V$ un morphisme de complexes de chaînes. Alors il existe un unique morphisme de CDGC $\varphi_f : C \rightarrow S^c(V)$ faisant commuter le diagramme :

$$\begin{array}{ccc} & & S^c(V) \\ & \nearrow \varphi_f & \downarrow \pi \\ C & \xrightarrow{f} & V \end{array}$$

Démonstration. La preuve est formellement duale de la preuve qu'un morphisme de complexes $V \rightarrow A$ induit un unique morphisme de CDGA $S(V) \rightarrow A$. (Exercice : décrire explicitement φ_f .) \square

12. Pour rappel, V^G désigne le sous-espace des éléments invariants sous l'action du groupe G .

Proposition 6.5.9. Soit V un complexe de chaînes. Pour tout morphisme de complexe de chaînes $f : S^c(V) \rightarrow V[-1]$ de degré 1, il existe une unique codérivation¹³ $\delta_f : S^c(V) \rightarrow S^c(V)$ qui fait commuter le diagramme :

$$\begin{array}{ccc} & \delta_f \nearrow & S^c(V)[-1] \\ & & \downarrow \pi \\ S^c(V) & \xrightarrow{f} & V[-1] \end{array}$$

Démonstration. Idem. (Exercice : décrire explicitement δ_f .) □

Définition 6.5.10. Soit \mathfrak{g} une DGLA. Son *complexe de Chevalley–Eilenberg* $C_*^{CE}(\mathfrak{g})$ est la CDGC quasi-colibre :

$$C_*^{CE}(\mathfrak{g}) := (S^c(\mathfrak{g}[1]), d + \delta),$$

où la différentielle est la somme de la différentielle interne de $S^c(\mathfrak{g}[1])$ et de¹⁴ :

$$\delta(x_1 \dots x_n) = \sum_{1 \leq i < j \leq n} \pm [x_i, x_j] x_1 \dots \hat{x}_i \dots \hat{x}_j \dots x_n.$$

Remarque 6.5.11. Cette différentielle supplémentaire est l'unique codérivation induite par $S^c(\mathfrak{g}[1]) \twoheadrightarrow (\mathfrak{g}[1]^{\otimes 2})^{\mathfrak{S}_2} \xrightarrow{[-, -]} \mathfrak{g}[2]$. On vérifie que sa somme avec la différentielle interne est de carré nul, ce qui découle des relations de Jacobi et Leibniz.

Définition 6.5.12. Soit C une CDGC. Son *complexe de Harrison* est la DGLA quasi-libre :

$$C_*^{\text{Harr}}(C) := (\mathbb{L}(C[-1]), d + \delta)$$

où la différentielle est la somme de la différentielle interne de $\mathbb{L}(C[-1])$ et de l'unique dérivation d'algèbre de Lie induite par $C[-1] \xrightarrow{\Delta} ((C[-1])^{\otimes 2})^{\mathfrak{S}_2}[1] \subset \mathbb{L}(C[-1])[1]$.

Théorème 6.5.13. Les foncteurs C_*^{CE} et C_*^{Harr} sont adjoints l'un de l'autre. Il existe des structures de catégories de modèles sur $\text{DGLA}_{\geq 1}$ et $\text{CDGC}_{\geq 2}$ telles que cette adjonction est une équivalence de Quillen.

Théorème 6.5.14. Soit X un ensemble simplicial 1-réduit de type fini. Alors il y a un zigzag de quasi-isomorphismes naturel :

$$\Omega_{\text{PL}}^*(X) \simeq (C_*^{CE}(\lambda X))^{\vee}$$

où $(C_*^{CE}(\lambda X))^{\vee}$ est la CDGA duale de la CDGC de $C_*^{CE}(\lambda X)$.

On peut donc passer d'un modèle de Sullivan à un modèle de Quillen et vice-versa.

13. C'est-à-dire une application $\delta : C \rightarrow C$ telle que $\Delta\delta = (\delta \otimes 1 + 1 \otimes \delta)\Delta$.

14. La notation $\dots \hat{x}_i \dots$ signifie que l'élément x_i est omis des (\dots) .

Remarque 6.5.15. On peut même faire mieux que ça. Si $A = (S(V), d)$ est le modèle minimal de X , alors le dual $\mathfrak{g} := V^\vee[-1]$ est ce que l'on appelle une algèbre de Lie (différentielle graduée) à homotopie près, ou encore une algèbre L_∞ . Considérons la restriction $d|_V : V \rightarrow S(V)$, qui se dualise en une suite d'applications $l_i : \mathfrak{g}^{\otimes i} \rightarrow \mathfrak{g}$ de degrés $i - 2$.

- Poids 1 : $l_1 =: \delta : \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}$ est une différentielle de degré -1 et fait de \mathfrak{g} un complexe de chaînes.
- Poids 2 : $l_2 =: [-, -]_2 : \mathfrak{g}^{\otimes 2} \rightarrow \mathfrak{g}$ est une application bilinéaire de degré zéro. On vérifie que la commutativité de A entraîne que l_2 est antisymétrique, et la relation $d(ab) = (da)b \pm a(db)$ dans A entraîne que l_2 vérifie la relation de Leibniz. Elle ne vérifie cependant pas la relation de Jacobi en général, mais...
- Poids 3 : $l_3 =: [-, -, -]_3 : \mathfrak{g}^{\otimes 3} \rightarrow \mathfrak{g}$ est une application trilinéaire de degré 1 qui s'annule sur les shuffles (ce qui généralise l'antisymétrie). La compatibilité avec la différentielle s'exprime de la façon suivante :

$$[x, [y, z]] \pm [y, [z, x]] \pm [z, [x, y]] = [dx, y, z] \pm [x, dy, z] \pm [x, y, dz] \pm d[x, y, z].$$

Le crochet l_3 définit donc une homotopie entre la relation de Jacobi pour l_2 et l'application nulle ; en un certain sens, cette relation de Jacobi est donc vérifiée « à homotopie près ».

- Poids 4 : $l_4 =: [-, -, -, -]_4 : \mathfrak{g}^{\otimes 4} \rightarrow \mathfrak{g}$ est quadrilinéaire de degré 2 et définit une homotopie pour une « relation de Jacobi supérieure » que vérifient l_2 et l_3 . On peut informellement comprendre cette relation de la manière suivante. Le crochet l_3 définit plusieurs homotopies entre la relation de Jacobi et 0 suivant l'ordre dans lequel on met les variables x, y, z . En mettant ces homotopies bout à bout, on obtient potentiellement une classe d'homologie dans \mathfrak{g} décrite par cette relation de Jacobi supérieure, qui est donc tuée par l_4 .
- La suite continue avec $l_5, l_6 \dots$: la différentielle de l_n tue une relation de Jacobi supérieure faisant intervenir l_2, \dots, l_{n-1} .

Le modèle de Quillen λX est une DGLA et c'est donc également une d'algèbre L_∞ : les crochets supérieurs l_3, l_4, \dots s'annulent et la relation de Jacobi est strictement vérifiée. On peut alors montrer que λX est quasi-isomorphisme (comme algèbre L_∞) à $\mathfrak{g} = V^\vee[-1]$.

7 Infini-catégories

Il arrive parfois qu'une définition « naturelle » produise une catégorie où la composition n'est plus associative. Par exemple, si on définit naïvement le groupoïde fondamental πX d'un espace X comme la catégorie dont les objets sont les points de X et les morphismes sont les chemins entre deux points, on obtient quelque chose qui ressemble fortement à une catégorie, à ceci près que la composition (concaténation des chemins) n'est pas strictement associative, mais l'est seulement à homotopie près. L'unité et les inverses ne sont pas non plus stricts.

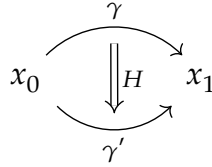
On peut résoudre ce problème en « strictifiant » : on remplace les chemins par les classes d'homotopie de chemins relativement aux extrémités. Mais ce faisant, on perd énormément d'information. La définition naïve du groupoïde fondamental contient toute l'information homotopique : $\pi_0(X)$ est l'ensemble des composantes connexes de la catégorie, et chaque composante connexe est équivalente à l'espace des lacets ΩX (basé en un point de la composante). En revanche, dans la définition stricte, il ne reste plus que l'information des composantes connexes et des groupes fondamentaux ; tout l'information « supérieure » (ici, en degré ≥ 2) a disparue. Le quotient par la relation d'homotopie est bien trop brutal.

Un phénomène similaire se produit dans l'étude des catégories de modèles. Étant donnée une catégorie de modèles C , sa catégorie homotopique $\mathrm{Ho}(C)$ ne contient plus beaucoup d'informations sur C . Cela est notamment manifeste lorsque l'on s'intéresse aux (co)limites homotopiques : la catégorie $\mathrm{Ho}(C)$ admet en général très peu de (co)limites, et il est nécessaire de retourner dans le monde des catégories de modèles, d'y considérer des catégories de diagrammes, puis de repasser à la catégorie homotopique (schématiquement, $\mathrm{Ho}(C)^I \neq \mathrm{Ho}(C^I)$). Une des motivations possibles pour les ∞ -catégories est d'introduire un objet à mi-chemin entre les catégories de modèles et leurs catégories homotopiques, qui perdraient moins d'informations et qu'on pourrait étudier avec de nouveaux outils.

Une autre motivation possible est la suivante. La définition de catégorie de modèles fait intervenir des classes de morphismes auxiliaires : les fibrations et les cofibrations. Ces classes auxiliaires ne servent en principe pas à définir la catégorie homotopie $\mathrm{Ho}(C) = C[\mathcal{W}^{-1}]$, qui ne dépend que de C et des équivalences faibles. Elles ne servent « qu'à » pouvoir calculer explicitement les morphismes dans la catégorie homotopique (qui seraient sinon donnés par des zigzags ingérables). Une autre motivation pour les ∞ -catégories est de pouvoir étudier des cas où l'on cherche à inverser une classe d'équivalences faibles dans une catégorie donnée, sans devoir introduire toute la machinerie des (co)fibrations.

La philosophie générale de la théorie des catégories supérieures (dont les ∞ -catégories

font partie) est illustrée par le groupoïde fondamental πX d'un espace X . Plutôt que de quotienter par la relation d'homotopie, on peut considérer une homotopie comme un chemin entre deux chemins. Si $\gamma, \gamma' : I \rightarrow X$ sont deux chemins avec $\gamma(0) = \gamma'(0) = x_0$, $\gamma(1) = \gamma'(1) = x_1$, et si H est une homotopie entre les deux, on peut représenter cela par le diagramme suivant :



Si $x_0 = x_1$ et que $\gamma = \gamma'$ est le chemin constant, alors H représente un élément de $\pi_2(X, x_0)$: en rajoutant l'information des homotopies (chemins entre chemins) dans le groupoïde fondamental, on récupère donc une information homotopique de degré 2. L'égalité des chemins est remplacée par l'existence d'un chemin entre deux chemins. On voit notamment que si l'on se donne trois chemins composables $\gamma, \gamma', \gamma''$, alors il existe un chemin entre $\gamma(\gamma'\gamma'')$ et $(\gamma\gamma')\gamma''$, et la composition est donc associative modulo un chemin entre chemins.

En termes catégoriques, si un chemin est un morphisme, alors une homotopie est un morphisme entre morphisme, ou 2-morphisme. Bien sûr, il peut exister de nombreux 2-morphismes entre deux morphismes données. On peut composer les 2-morphismes en concaténant les chemins, mais cette composition n'est pas associative ! Elle est seulement associative modulo un chemin entre homotopie (ou chemin entre chemin entre chemin, qu'on raccourcit en 3-morphisme).

On aura vite fait de voir qu'une fois lancés dans cette direction, on devra définir des n -morphisms pour tout $n \geq 1$ (et par souci de cohérence, nous appellerons les objets 0-morphismes). On peut composer les $(n + 1)$ -morphisms entre deux n -morphisms fixés, et toutes les compositions doivent vérifier des relations de compatibilité entre elles. On arrive alors à la notion de catégorie supérieure. Les catégories supérieures que nous allons considérer (groupoïdes fondamentaux, nerf d'une catégorie, localisation simpliciale d'une catégorie de modèles...) sont telles que les n -morphisms sont inversibles dès que $n \geq 2$; on les appelle les $(\infty, 1)$ -catégories, ou simplement ∞ -catégorie. Les groupoïdes fondamentaux vérifient même que tous les 1-morphisms sont inversibles ; on les appelle $(\infty, 0)$ -catégories, ou ∞ -groupoïdes.

Exprimer les relations de compatibilité dans une ∞ -catégorie s'avère rapidement difficile. Il existe de nombreux modèles des ∞ -catégories et on peut se référer à [Ber18] pour une vue d'ensemble de différents modèles. Dans ces notes, on s'intéressera particulièrement aux quasi-catégories, initialement développées par Joyal [Joy08 ; Joy02] et approfondies par Lurie [Lur09 ; Lur17] (voir également les travaux de Boardman-Vogt [BV73] où elles s'appelaient complexes de Kan faibles).

7.1 Quasi-catégories

7.1.1 Nerf d'une catégorie

Définition 7.1.1. Soit C une petite catégorie. Son *nerf* $N_\bullet C$ est un ensemble simplicial dont les n -simplexes sont données par les suites de n morphismes composables :

$$N_n C = \{X_0 \xrightarrow{f_1} X_1 \xrightarrow{f_2} \dots \xrightarrow{f_n} X_n\}$$

En particulier, $N_0 C$ est l'ensemble des objets de C .

Les applications de faces et dégénérescences sont données par :

$$\begin{aligned} d_0(X_0 \xrightarrow{f_1} \dots \xrightarrow{f_n} X_n) &= X_1 \xrightarrow{f_2} \dots \xrightarrow{f_n} X_n, \\ d_i(X_0 \xrightarrow{f_1} \dots \xrightarrow{f_n} X_n) &= X_0 \xrightarrow{f_1} \dots \xrightarrow{f_{i-1}} X_{i-1} \xrightarrow{f_{i+1} \circ f_i} X_{i+1} \xrightarrow{f_{i+2}} \dots \xrightarrow{f_n} X_n \quad (1 < i < n), \\ d_n(X_0 \xrightarrow{f_1} \dots \xrightarrow{f_n} X_n) &= X_0 \xrightarrow{f_1} \dots \xrightarrow{f_{n-1}} X_{n-1}, \\ s_j(X_0 \xrightarrow{f_1} \dots \xrightarrow{f_n} X_n) &= (X_0 \xrightarrow{f_1} \dots \xrightarrow{f_j} X_j \xrightarrow{\text{id}_{X_j}} X_j \xrightarrow{f_{j+1}} \dots \xrightarrow{f_n} X_n). \end{aligned}$$

On peut vérifier à la main que c'est un ensemble simplicial. Cependant, il y a un point de vue plus « théorique » qui permet de simplifier.

Définition 7.1.2. On note cat la catégorie des petites catégories.

Rappelons que les objets de Δ sont les $[n] = \{0 < 1 < \dots < n\}$ pour $n \geq 0$ et que les morphismes sont les applications croissantes. Tout ensemble (partiellement) ordonné peut se voir comme une catégorie : on décide que $\text{Hom}_{[n]}(i, j)$ est un singleton si $i \leq j$, et qu'il est vide sinon. Un foncteur $[m] \rightarrow [n]$ est la même chose qu'une application croissante.¹ On obtient ainsi un foncteur $\Delta \rightarrow \text{cat}$ qui envoie l'ensemble ordonné $[n]$ sur la catégorie $[n]$; en d'autres termes, on a un objet cosimplicial dans la catégorie des petites catégories :

$$[\bullet] : \Delta \rightarrow \text{cat}, [n] \mapsto [n].$$

On remarque alors que le nerf $N_\bullet C$ est tout simplement donné par :

$$N_\bullet C = \text{Hom}_{\text{cat}}([\bullet], C)$$

et est donc bien un ensemble simplicial. Comme $\text{Hom}_{\text{cat}}([\bullet], -)$ est fonctoriel, on voit également que :

Proposition 7.1.3. *Le nerf définit un foncteur :*

$$N_\bullet : \text{cat} \rightarrow \text{sSet}.$$

1. En langage savant, la catégorie des ensembles partiellement ordonnés est une sous-catégorie pleine de la catégorie des catégories.

Ce point de vue fait apparaître le fait que N_\bullet est similaire au foncteur « ensemble singulier » $S_\bullet = \text{Hom}_{\text{Top}}(\Delta^\bullet, -)$. On verra par la suite que N_\bullet a un adjoint à gauche, analogue au foncteur de réalisation géométrique. On peut déjà voir immédiatement :

Proposition 7.1.4. *Le foncteur N_\bullet préserve les limites.*

Exemple 7.1.5. Le lemme de Yoneda entraîne que $N_\bullet[n] \cong \Delta^n$.

Étudions les propriétés homotopiques du nerf.

Proposition 7.1.6. *Soit $F, G : C \rightarrow D$ deux foncteurs et $\eta : F \Rightarrow G$ une transformation naturelle. Alors η définit une homotopie simpliciale entre $N_\bullet F$ et $N_\bullet G$.*

Démonstration. On cherche à définir une application $H : N_\bullet C \times \Delta^1 \rightarrow N_\bullet D$ telle que $H|_{N_\bullet C \times \{0\}} = N_\bullet F$ et $H|_{N_\bullet C \times \{1\}} = N_\bullet G$. La donnée d'une transformation naturelle $\eta : F \Rightarrow G$ est équivalente (exercice) à la donnée d'un foncteur $\hat{\eta} : C \times [1] \rightarrow D$ (où $[1]$ est la catégorie avec deux objets $0, 1$ et un unique morphisme entre les deux) vérifiant $\hat{\eta}(c, 0) = F(c)$ et $\hat{\eta}(c, 1) = G(c)$. Si on applique le foncteur nerf, on obtient une application simpliciale :

$$N_\bullet \hat{\eta} : N_\bullet(C \times [1]) \rightarrow N_\bullet D.$$

Comme N_\bullet préserve les limites et que $N_\bullet[1] = \Delta^1$, on obtient ainsi une application $H : N_\bullet C \times \Delta^1 \rightarrow N_\bullet D$. On vérifie alors que c'est bien l'homotopie voulue. \square

Corollaire 7.1.7. *Soit $F : C \rightleftarrows D : G$ une adjonction entre deux petites catégories. Alors $N_\bullet C$ et $N_\bullet D$ sont homotopiquement équivalentes.*

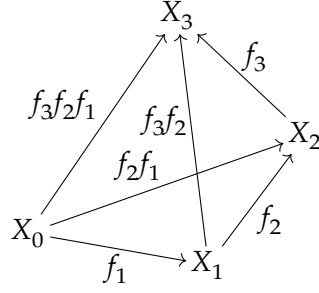
Démonstration. L'unité $\eta : \text{id}_C \Rightarrow G \circ F$ et la counité $\varepsilon : F \circ G \Rightarrow \text{id}_D$ induisent des homotopies qui montrent que $N_\bullet F$ et $N_\bullet G$ sont inverses l'une de l'autre à homotopie près. \square

Exemple 7.1.8. Si une petite catégorie C admet un objet initial, alors $N_\bullet C$ est contractile : en effet, dans ce cas, l'inclusion $[0] \rightarrow C$ qui envoie 0 sur l'objet initial admet un adjoint à droite. De même, si C admet un objet terminal alors $N_\bullet C$ est contractile (l'inclusion admet alors un adjoint à gauche).

Ces exemples pourraient faire penser que le nerf n'a que peu d'intérêt ; il n'en est rien. Nous allons voir que le nerf définit une inclusion pleinement fidèle de cat dans $s\text{Set}$. En un certain sens, le nerf de C contient donc toute la structure de catégorie de C . Simplement, le type d'homotopie est un invariant trop imprécis pour récupérer cette structure de catégorie. Nous verrons dans la Section 7.2 que l'on peut définir une structure de catégorie de modèles sur $s\text{Set}$ qui se prête mieux à l'étude des nerfs.

Répondons à la question suivante : quand est-ce qu'un ensemble simplicial est isomorphe au nerf d'une petite catégorie ? La réponse est donnée par des conditions ressemblant à celles définissant ensemble simplicial fibrant.

Introduisons d'abord une représentation graphique pour le nerf. Graphiquement, on pourra représenter un élément de $N_n C = \text{Hom}_{s\text{Set}}(\Delta^n, N_\bullet C)$ comme dans la Figure 7.1 : chacun des sommets $0, 1, \dots, n$ est décoré par un objet de C , les arêtes $i \rightarrow i + 1$ sont

FIG. 7.1: Représentation graphique d'un élément de $N_3 C$

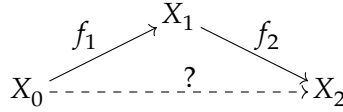
décorés par des morphismes $f_{i+1} : X_i \rightarrow X_{i+1}$, et on décore les autres arêtes par les compositions appropriées.

On rappelle les cornets $\Lambda_k^n \subset \Delta^n$, définis pour $0 \leq k \leq n$ (Définition 5.2.2).

Définition 7.1.9. Un cornet $\Lambda_k^n \subset \Delta^n$ est dit *interne* si $0 < k < n$. Les cornets $\Lambda_0^n \subset \Delta^n$ et $\Lambda_n^n \subset \Delta^n$ sont respectivement appelés le *cornet initial* et le *cornet final*.

On rappelle (Lemme 5.2.3) qu'une application simpliciale $\Lambda_k^n \rightarrow X$ est équivalente à la donnée de $(n-1)$ -simplexes $x_0, \dots, \hat{x}_k, \dots, x_n \in X_{n-1}$ vérifiant $d_i x_j = d_{j-1} x_i$ pour tous i, j tels que l'équation aie un sens. On peut remplir le cornet s'il existe un n -simplexe $x \in X_n$ tel que $d_i x = x_i$.

Les cornets dans $N_\bullet C$ se représentent comme dans la Figure 7.1 mais avec une flèche (et donc toutes les compositions qui la font intervenir) manquante, voir Figure 7.2.

FIG. 7.2: Représentation graphique d'un cornet $\Lambda_1^2 \rightarrow N_\bullet C$

On remarque sur la figure précédente que l'on peut toujours remplir un cornet de type Λ_1^2 : il suffit de mettre $f_2 f_1$ pour la troisième flèche, et comme le diagramme commute, on a bien un 2-simplexe. De plus, ce remplissage est unique. En revanche, on ne peut pas toujours remplir un cornet de type Λ_0^2 ou Λ_2^2 : pour ça, il faudrait que tous les morphismes soient inversibles. Plus généralement :

Lemme 7.1.10. Soit C une petite catégorie. Alors l'application de restriction $\text{Hom}_{\text{sSet}}(\Delta^n, N_\bullet C) \rightarrow \text{Hom}_{\text{sSet}}(\Lambda_k^n, N_\bullet C)$ est une bijection pour tout $n \geq 0$ et tout $0 < k < n$. En d'autres termes, $N_\bullet C \rightarrow *$ a la propriété de relèvement unique par rapport aux inclusions des cornets internes dans le simplexe $\Lambda_k^n \subset \Delta^n$.

Démonstration. Soit $f : \Lambda_k^n \rightarrow N_\bullet C$ une application simpliciale avec $0 < k < n$. Montrons qu'il existe une unique application $\Delta^n \rightarrow C$ qui se restreint en f . On représente f par des $(n-1)$ -simplexes $x_0, \dots, \hat{x}_k, \dots, x_n \in N_{n-1} C$ qui vérifient $d_i x_j = d_{j-1} x_i$ pour $i < j$. On rappelle que le cornet est interne, donc $k \neq 0, n$. Grâce à la relation $d_0 x_n = d_{n-1} x_0$,

on peut écrire (en appliquant plusieurs fois les faces pour vérifier que les objets et les morphismes du milieu coïncident) :

$$\begin{aligned} x_0 &= X_1 \xrightarrow{f_2} \dots \xrightarrow{f_n} X_n, \\ x_n &= X_0 \xrightarrow{f_1} \dots \xrightarrow{f_{n-1}} X_{n-1}. \end{aligned}$$

On doit alors nécessairement définir $x = X_0 \xrightarrow{f_1} \dots \xrightarrow{f_{n-1}} X_n$ et on vérifie à la main que $d_i x = x_i$. \square

Proposition 7.1.11. *Le foncteur $N_\bullet : \text{cat} \rightarrow \text{sSet}$ est pleinement fidèle, et son image est constitué des ensembles simpliciaux qui ont la RLP unique par rapport à tous les cornets internes.*

Démonstration. On a vu que si C est une petite catégorie, alors $N_\bullet C$ vérifie la propriété de relèvement voulue. Réciproquement, soit X un ensemble simplicial qui a la RLP par rapport à tous les cornets internes. On définit une petite catégorie C de la façon suivante :

- Les objets de C sont les 0-simplexes X_0 .
- Soit $x, y \in X_0$. L'ensemble des morphismes entre x et y est donné par :

$$\text{Hom}_C(x, y) = \{f \in X_1 \mid d_1 f = x \text{ et } d_0 f = y\}.$$

- L'identité de $x \in X_0$ est $s_0(x) \in X_1$.
- La composition est définie de la manière suivante. Soit x, y, z trois objets et $f : x \rightarrow y, g : y \rightarrow z$ deux morphismes. Alors f et g définissent ensemble un cornet $\Lambda_1^2 \rightarrow X$ (voir Figure 7.2). Il existe donc un unique $\gamma \in X_2$ tel que $d_0 \gamma = g$ et $d_2 \gamma = f$. On définit alors $g \circ f := d_1 \gamma$.

Il faut vérifier que la composition est associative et unitaire. L'associativité se démontre exactement comme dans la Proposition 5.3.13. L'unitarité découle de l'unicité des relèvement et des identités simpliciales (exercice).

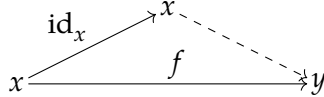
Montrons maintenant que N_\bullet est pleinement fidèle, c.-à-d. que $N_\bullet : \text{Hom}_{\text{cat}}(C, D) \rightarrow \text{Hom}_{\text{sSet}}(N_\bullet C, N_\bullet D)$ est une bijection pour toutes les petites catégories C et D . Soit $\varphi : N_\bullet C \rightarrow N_\bullet D$ une application simpliciale, montrons qu'il existe un unique foncteur F tel que $N_\bullet F = \varphi$. Alors $\varphi_0 : N_0 C \rightarrow N_0 D$ définit une application des objets de C dans les objets de D . On doit nécessairement définir $F : C \rightarrow D$ par φ_0 sur les objets. Par définition du nerf, pour $x, y \in C = N_0 C$, on a une égalité entre $\text{Hom}_C(x, y)$ et $\{f \in N_1 C \mid d_0 f = x \text{ et } d_1 f = y\}$. L'application φ_1 envoie ce sous-ensemble de $N_1 C$ sur le sous-ensemble de $N_1 D$ défini de manière similaire, grâce aux identités simpliciales. On doit donc définir F par φ_1 sur les morphismes, et on vérifie qu'avec cette définition on obtient un foncteur $F : C \rightarrow D$ tel que $N_\bullet F = \varphi$. \square

Un nerf n'est en revanche généralement pas fibrant :

Définition 7.1.12. Un *groupoïde* est une catégorie dont tous les morphismes sont inversibles.

Lemme 7.1.13. Soit C une petite catégorie. Le nerf $N_\bullet C$ est fibrant (c.-à-d. que l'on peut remplir tous les cornets, internes et externes) si et seulement si C est un groupoïde. Dans ce cas, les remplissages des cornets externes sont uniques.

Démonstration. Supposons que $N_\bullet C$ est fibrant. On peut donc remplir tous les cornets $\Lambda_0^2 \rightarrow N_\bullet C$ et $\Lambda_2^2 \rightarrow N_\bullet C$. Soit $f : x \rightarrow y$ un morphisme de C ; on définit un cornet $\Lambda_0^2 \rightarrow N_\bullet C$ par :



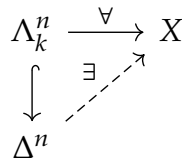
En remplissant ce cornet, on obtient un inverse à droite g de f . En remplissant un cornet similaire de type $\Lambda_2^2 \rightarrow N_\bullet C$, on obtient un inverse à gauche g' de f . On a $g = g'fg = g'$ donc $g = g'$ est un inverse de f , qui est donc un isomorphisme.

La réciproque et l'unicité se démontrent comme le Lemme 7.1.10, en utilisant les inverses dans C pour remplir les cornets externes. \square

7.1.2 Définition des quasi-catégories

Informellement, une quasi-catégorie est un ensemble simplicial avec des propriétés qui miment celles que possèdent le nerf d'une catégorie. (Le nerf d'une catégorie sera d'ailleurs un exemple de quasi-catégorie.) La différence avec le nerf d'une catégorie réside dans l'unicité. Dans une catégorie normale, il n'y a qu'une seule manière de composer deux morphismes, qu'une seule identité par objet, qu'une seule « égalité d'associativité » entre $f(gh)$ et $(fg)h$. Dans une quasi-catégorie, il y a potentiellement plusieurs manières de composer deux morphismes ; mais deux compositions différentes seront équivalentes en un sens à définir. Comme il y a plusieurs manières de composer les morphismes, demander une égalité stricte pour l'associativité n'a pas de sens, mais on peut demander que toutes les manières de composer trois morphismes soient homotopes entre elles, et que toutes les homotopies entre telles homotopies soient homotopes entre elles, etc. La définition des quasi-catégories est une façon très compacte d'encapsuler toutes ces propriétés.

Définition 7.1.14. Une *quasi-catégorie* est un ensemble simplicial qui a la propriété de relèvement à droite par rapport aux inclusions de cornets internes $\Lambda_k^n \subset \Delta^n$ ($0 < k < n$) :



Un *quasi-foncteur* est une application simpliciale entre deux quasi-catégories.

Exemple 7.1.15. Un ensemble simplicial fibrant est une quasi-catégorie.

Exemple 7.1.16. Soit C une petite catégorie. Alors $N_{\bullet}C$ est une quasi-catégorie (Lemme 7.1.10). Un quasi-foncteur $N_{\bullet}C \rightarrow N_{\bullet}D$ est un foncteur $C \rightarrow D$ (Proposition 7.1.11). On obtient une inclusion pleinement fidèle de la catégorie des petites catégories dans la catégorie des quasi-catégories.

7.2 Structure de modèles de Joyal

7.3 Catégories simpliciales

7.4 Quasi-catégorie associée à une catégorie de modèles

Bibliographie

- [Ber18] Julia E. BERGNER. *The homotopy theory of $(\infty, 1)$ -categories*. T. 90. London Mathematical Society Student Texts. Cambridge : Cambridge University Press, 2018, p. xiv+273. ISBN : 978-1-107-49902-7. DOI : [10.1017/9781316181874](https://doi.org/10.1017/9781316181874).
- [BV68] J. Michael BOARDMAN et Rainer M. VOGT. « Homotopy-everything H -spaces ». In : *Bull. Amer. Math. Soc.* 74 (1968), p. 1117-1122. ISSN : 0002-9904. DOI : [10.1090/S0002-9904-1968-12070-1](https://doi.org/10.1090/S0002-9904-1968-12070-1).
- [BV73] J. Michael BOARDMAN et Rainer M. VOGT. *Homotopy invariant algebraic structures on topological spaces*. Lecture Notes in Mathematics 347. Berlin Heidelberg : Springer, 1973, p. x+257. ISBN : 978-3-540-06479-4. DOI : [10.1007/BFb0068547](https://doi.org/10.1007/BFb0068547).
- [Bre93] Glen E. BREDON. *Topology and geometry*. Graduate Texts in Mathematics 139. New York : Springer-Verlag, 1993, p. xiv+557. ISBN : 0-387-97926-3. DOI : [10.1007/978-1-4757-6848-0](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6848-0).
- [DGMS75] Pierre DELIGNE, Phillip GRIFFITHS, John MORGAN et Dennis SULLIVAN. « Real homotopy theory of Kähler manifolds ». In : *Invent. Math.* 29.3 (1975), p. 245-274. ISSN : 0020-9910. DOI : [10.1007/BF01389853](https://doi.org/10.1007/BF01389853).
- [DS95] William G. DWYER et Jan SPALIŃSKI. « Homotopy theories and model categories ». In : *Handbook of algebraic topology*. Amsterdam : North-Holland, 1995, p. 73-126. DOI : [10.1016/B978-044481779-2/50003-1](https://doi.org/10.1016/B978-044481779-2/50003-1).
- [FHT01] Yves FÉLIX, Stephen HALPERIN et Jean-Claude THOMAS. *Rational homotopy theory*. Graduate Texts in Mathematics 205. New York : Springer-Verlag, 2001, p. xxxiv+535. ISBN : 0-387-95068-0. DOI : [10.1007/978-1-4613-0105-9](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0105-9).
- [FHT15] Yves FÉLIX, Steve HALPERIN et Jean-Claude THOMAS. *Rational homotopy theory. II*. Hackensack, NJ : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015, p. xxxvi+412. ISBN : 978-981-4651-42-4.
- [FOT08] Yves FÉLIX, John OPREA et Daniel TANRÉ. *Algebraic models in geometry*. Oxford Graduate Texts in Mathematics 17. Oxford : Oxford University Press, 2008, p. xxii+460. ISBN : 978-0-19-920651-3.
- [Fre17] Benoit FRESSE. *Homotopy of Operads and Grothendieck–Teichmüller Groups*. T. 1. The Algebraic Theory and its Topological Background. Mathematical Surveys and Monographs 217. Providence, RI : Amer. Math. Soc., 2017, p. xlv+532. ISBN : 978-1-4704-3481-6.

- [Fri08] Greg FRIEDMAN. « An elementary illustrated introduction to simplicial sets ». In : *Rocky Mountain J. Math.* 42.2 (2008), p. 353-423. arXiv : [0809.4221](#).
- [Gin19] Grégory GINOT. *Introduction à l'homotopie*. Notes de cours. 2019. 210 p. URL : <https://www.math.univ-paris13.fr/%7Eginot/Homotopie/Ginot-homotopie2019.pdf>.
- [GK94] Victor GINZBURG et Mikhail KAPRANOV. « Koszul duality for operads ». In : *Duke Math. J.* 76.1 (1994), p. 203-272. ISSN : 0012-7094. DOI : [10.1215/S0012-7094-94-07608-4](#).
- [GJ99] Paul G. GOERSS et John F. JARDINE. *Simplicial homotopy theory*. Progress in Mathematics 174. Basel : Birkhäuser Verlag, 1999, p. xvi+510. ISBN : 3-7643-6064-X. DOI : [10.1007/978-3-0348-8707-6](#).
- [Hat02] Allen HATCHER. *Algebraic topology*. Cambridge : Cambridge University Press, 2002, p. xii+544. ISBN : 0-521-79160-X.
- [Hes07] Kathryn HESS. « Rational homotopy theory : a brief introduction ». In : *Interactions between homotopy theory and algebra*. Contemp. Math. 436. Providence, RI : Amer. Math. Soc., 2007, p. 175-202. DOI : [10.1090/conm/436/08409](#).
- [Hir03] Philip S. HIRSCHHORN. *Model categories and their localizations*. Mathematical Surveys and Monographs 99. Providence, RI : American Mathematical Society, 2003, p. xvi+457. ISBN : 0-8218-3279-4.
- [Hov99] Mark HOVEY. *Model categories*. Mathematical Surveys and Monographs 63. Providence, RI : American Mathematical Society, 1999, p. xii+209. ISBN : 0-8218-1359-5.
- [Joy02] André JOYAL. « Quasi-categories and Kan complexes ». In : *J. Pure Appl. Algebra* 175.1-3 (2002). Special volume celebrating the 70th birthday of Professor Max Kelly, p. 207-222. ISSN : 0022-4049. DOI : [10.1016/S0022-4049\(02\)00135-4](#).
- [Joy08] André JOYAL. « The Theory of Quasi-Categories and its Applications ». Lectures at CRM Barcelona. 2008.
- [Kon93] Maxim KONTSEVICH. « Formal (non)commutative symplectic geometry ». In : *The Gel'fand Mathematical Seminars, 1990-1992*. Boston, MA : Birkhäuser Boston, 1993, p. 173-187. DOI : [10.1007/978-1-4612-0345-2_11](#).
- [LV12] Jean-Louis LODAY et Bruno VALLETTE. *Algebraic operads*. Grundlehren der Mathematischen Wissenschaften [Fundamental Principles of Mathematical Sciences] 346. Heidelberg : Springer, 2012, p. xxiv+634. ISBN : 978-3-642-30361-6. DOI : [10.1007/978-3-642-30362-3](#).

- [Lur09] Jacob LURIE. *Higher topos theory*. Annals of Mathematics Studies 170. Princeton, NJ : Princeton University Press, 2009, p. xviii+925. ISBN : 978-0-691-14049-0. URL : <http://www.math.harvard.edu/~lurie/papers/HTT.pdf>.
- [Lur17] Jacob LURIE. « Higher Algebra ». 18 sept. 2017. URL : <http://www.math.harvard.edu/~lurie/papers/HA.pdf>. Prépubl.
- [May72] J. Peter MAY. *The geometry of iterated loop spaces*. Lectures Notes in Mathematics 271. Berlin : Springer-Verlag, 1972, p. viii+175. DOI : [10.1007/BFb0067491](https://doi.org/10.1007/BFb0067491).
- [Qui69] Daniel QUILLEN. « Rational homotopy theory ». In : *Ann. of Math.* (2) 90 (1969), p. 205-295. ISSN : 0003-486X. JSTOR : [1970725](https://www.jstor.org/stable/1970725).
- [Qui67] Daniel G. QUILLEN. *Homotopical algebra*. Lecture Notes in Mathematics 43. Berlin : Springer-Verlag, 1967, iv+156 pp. (not consecutively paged).
- [Sai17] Henri Paul de SAINT-GERVAIS. *Analysis Situs*. 2017. URL : <http://analysis-situs.math.cnrs.fr>.
- [Sch15] Pierre SCHAPIRA. *Categories and homological algebras*. Lecture notes. 2015. URL : <https://webusers.imj-prg.fr/~Pierre.schapira/lectnotes/HomAl.pdf>.
- [Spa95] Edwin SPANIER. *Algebraic topology*. Berlin : Springer-Verlag, 1995, p. xiv+528. ISBN : 978-1-4684-9322-1. DOI : [10.1007/978-1-4684-9322-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-9322-1).
- [Wei94] Charles A. WEIBEL. *An introduction to homological algebra*. Cambridge Studies in Advanced Mathematics 38. Cambridge : Cambridge University Press, 1994, p. xiv+450. ISBN : 0-521-43500-5.

Index

\bar{A} , 66

$C_*^{CE}(\mathfrak{g})$, 88

$[A, X]$, 22

$C[\mathcal{W}^{-1}]$, 17

Δ, Δ_\bullet^n , 45

\triangle^n , 46

$\partial\Delta_\bullet^n$, 48

f_1 , 66

Λ_k^n , 48

$\Omega_{PL}^*(X)$, 74

$\Omega_{PL}^*(\Delta^n)$, 73

\perp , 14

$\pi_0(X)$, 7

$\pi_n(X, x_0)$, 7

πC_{cf} , 22

$\pi_n(X_\bullet, v)$, 55

$|X_\bullet|$, 47

$\langle A \rangle$, 74

$\stackrel{l}{\simeq}$, 18

$\stackrel{r}{\simeq}$, 21

0VG, 65

0VGi, 65

1-réduit, 62, 72

2 parmi 3, 14

A

adjonction de Quillen, 35

algèbre

de Lie différentielle graduée, 84

de Sullivan, 69

différentielle graduée, 64

différentielle graduée commutative,
64

minimale, 69

relative de Sullivan, 69

relative minimale, 69

symétrique, 65

application simpliciale, 46

augmentation, 66

C

catégorie de modèles, 13

cofibrement engendrée, 31

combinatoire, 43

catégorie des simplexes, 45

catégorie homotopique, 18

catégorie très petite, 42

CDGA, 64

CDGC, 87

$\text{Ch}(R)$, $\text{Ch}_{\geq 0}(R)$, 9

$\text{Ch}^{\geq 0}(\mathbb{Q})$, 63

cofibrant, 14

cofibrant (morphisme), 31

cofibration

acyclique, 14

dans une catégorie de modèles, 13

de complexes de chaînes, 25

de Hurewicz, 12

cogèbre, 86

cocommutative, 87

colibre, 87

coinvariants, 65

colimite homotopique, 41

commutateur, 85

compact (objet), 43

complexe

de Chevalley–Eilenberg, 88

de Harrison, 88

complexe cellulaire, 31

relatif, 31

complexe de chaînes, 9

complexe de cochaînes, 63

INDEX

cornet

- final, 95
- initial, 95
- interne, 95

$c\text{Set}$, 46

cylindre, 18

- topologique, 12

D

dérivation, 65

DGA, 64

DGLA, 84

dimension, 82

$D_n(A)$, 27

$D_n(R)$, 30

E

ensemble cosimplicial, 46

ensemble simplicial, 45

ensemble singulier, 47

équivalence

- de Quillen, 40
- d'homotopie, 7, 9
 - faible, 7
- faible
 - dans une catégorie de modèles, 13
 - de complexes de chaînes, 25
 - d'ensemble simpliciaux, 49
- rationnelle, 63

espaces faiblement équivalents, 8

F

fibrant, 14

fibration

- acyclique, 14
- dans une catégorie de modèles, 13
- de complexes de chaînes, 25
- de Hurewicz, 11
- de Kan, 49
- de Serre, 11

foncteur dérivé, 36

- total, 38

formel, 80

formes polynomiales
par morceaux, 74

sur le simplexe, 73

G

groupe d'homotopie simplicial, 55

groupoïde, 97

H

$\text{Ho}(\mathcal{C})$, 18

hocolim_I , 41

holim_I , 41

homotopie

- à droite, 21
- à gauche, 18
- de Sullivan, 71
- entre applications simpliciales, 55
- relative, 55

homotopie entre fonctions, 7

homotopie entre morphismes, 9

homotopiquement équivalents, 7

I

idéal d'augmentation, 66

indécomposables, 66

injectif (module), 10

injectif (morphisme), 31

invariants, 65

L

limite homotopique, 41

LLP, 14

localisation, 17

- de Bousfield, 62

M

$\text{Map}_\bullet(A, X)$, 52, 76

modèle

- de Quillen, 85
- de Sullivan, 79
- minimal, 79
- réel, 83

N

$N_\bullet \mathcal{C}$, 93

nerf, 93

O

objet chemin, 21

topologique, 11
 objet simplicial, 46

P

partie linéaire, 66
 petit (objet), 28
 pointé
 application, 7
 espace, 7
 homotopie, 7
 projectif (module), 10
 propriété de relèvement, 14

Q

QA , 66
 quasi-catégorie, 97
 quasi-isomorphe, 9
 quasi-isomorphisme, 9
 quasi-libre, 66

R

rationnel (ensemble simplicial), 63
 rationnellement elliptique, 82

rationnellement hyperbolique, 82

réalisation

 d'une CDGA, 74
 géométrique, 47
 remplacement (co)fibrant, 14
 rétract, 13
 RLP, 14

S

$S(V)$, 65
 $S_{\bullet}(Y)$, 47
 $S^c(V)$, 87
 simplexe (non-)dégénéré, 46
 $\sim_{\mathbb{Q}}$, 63
 $S_n(R)$, 30
 $sSet$, 45
 $sSet_{\geq 2}$, 62
 $sSet_{\geq 2}^{\mathbb{Q}}$, 63
 structure
 injective, 16, 41
 projective, 16, 25, 41, 67
 transférée à droite, 67