

Théorie de la programmation

*Basé sur le cours de Daniel HIRSCHKOFF
Notes prises par Hugo SALOU*



12 octobre 2024

Table des matières

Introduction.	4
1 Induction.	5
1.1 Définitions inductives d'ensembles.	5
1.2 Preuves par induction sur un ensemble inductif.	7
1.3 Définitions inductives de relations.	8
1.4 Preuves par induction sur une relation inductive.	12
2 Théorèmes de point fixe.	14
2.1 Définitions inductives de relations.	16
2.2 Définitions inductives d'ensembles.	19
2.3 Preuves par induction sur un ensemble inductif.	20
2.4 Preuves par induction sur une relation inductive.	21
2.4.1 Une première approche...	21
2.4.2 Une approche plus astucieuse...	22
2.5 Domaines et points fixes.	23
3 Les bases de Rocq.	25
3.1 Les définitions par induction : Inductive	25
3.2 Quelques preuves avec Rocq.	26
4 Sémantique opérationnelle.	28
4.1 Sémantique opérationnelle pour les expressions arith- métiques simples (EA).	29
4.1.1 Sémantique à grands pas sur EA.	30
4.1.2 Sémantique à petits pas sur EA.	31
4.1.3 Coïncidence entre grands pas et petits pas.	32
4.1.4 L'ensemble EA avec des erreurs à l'exécution.	34
4.1.5 Sémantique contextuelle pour EA.	35

- 4.2 Sémantique opérationnelle des expressions arithmétiques avec déclarations locales (LEA). 37
 - 4.2.1 Sémantique à grands pas sur LEA. 38
 - 4.2.2 Sémantique à petits pas sur LEA. 39
 - 4.2.3 Sémantique contextuelle pour LEA. 40
 - 4.2.4 Sémantique sur LEA avec environnement. 40
- 4.3 Un petit langage fonctionnel : FUN. 41
 - 4.3.1 Sémantique opérationnelle « informellement ». 42
 - 4.3.2 Sémantique opérationnelle de FUN (version 1). 43

Introduction.

Dans ce cours, on étudie la *sémantique des langages de programmation*. On présente des approches pour

- définir rigoureusement ce qu'est/ce que fait un programme ;
- établir mathématiquement des propriétés sur des programmes.

Par exemple,

- démontrer l'absence de *bug* dans un programme ;
- démontrer des propriétés sur des programmes de transformation de programme ;
- l'étude des nouveaux langages de programmation.

Dans ce cours, les langages fonctionnels (OCaml, Haskell, Scheme, ...) auront un rôle central.

1 Induction.

Sommaire.

1.1 Définitions inductives d'ensembles.	5
1.2 Preuves par induction sur un ensemble inductif.	7
1.3 Définitions inductives de relations.	8
1.4 Preuves par induction sur une relation inductive.	12

1.1 Définitions inductives d'ensembles.

Dans ce cours, les ensembles définis par induction représenteront les données utilisées par les programmes. De plus, les notions d'ensembles et de types seront identiques : on identifiera :

$$\underbrace{n \in \text{nat}}_{\text{ensemble}} \longleftrightarrow \underbrace{n : \text{nat.}}_{\text{type}}$$

Exemple 1.1 (Types définis inductivement). Dans le code ci-dessous, on définit trois types : le type `nat` représentant les entiers naturels (construction de Peano) ; le type `nlist` représentant les listes d'entiers naturels ; et le type `t` représentant les arbres binaires étiquetés par des entiers aux nœuds.

```
type nat = Z | S of nat
type nlist = Nil | Const of nat*nlist
type t1 = F | N of t1*nat*t1
```

Code 1.1 | *Trois types définis inductivement*

Définition 1.1. La *définition inductive d'un ensemble* t est la donnée de k constructeurs C_1, \dots, C_k , où chaque C_i a pour argument un n_i -uplet dont le type est $u_1^i * u_2^i * \dots * u_{n_i}^i$. L'opération « $*$ » représente le produit cartésien, avec une notation « à la OCaml ». De plus, chaque u_j^i est, soit t , soit un type pré-existant.

Exemple 1.2.

```
type t2 =
| F
| N2 of (t * nlist * t)
| N3 of (t * nat * t * nat * t)
```

Code 1.2 | *Un exemple de type*

Définition 1.2. Les *types algébriques* sont définis en se limitant à deux opérations :

- ▷ le produit cartésien « $*$ » ;
- ▷ le « ou », noté « $|$ » ou « $+$ », qui correspond à la somme disjointe ;

et un type :

- ▷ le type `unit`, noté `1`.

Exemple 1.3 (Quelques types algébriques...). ▷ Le type `bool` est alors défini par `1 + 1`.

- ▷ Le type « jour de la semaine » est alors défini par l'expression `1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1`.
- ▷ Le type `nat` vérifie l'équation $X = 1 + X$.
- ▷ Le type `nlist` vérifie l'équation $X = 1 + \text{nat} * X$.
- ▷ Le type `t option` est alors défini par `1 + t`.

Ces ensembles définis inductivement nous intéressent pour deux raisons :

- pour pouvoir calculer, c'est à dire définir des fonctions de \mathbf{t} vers \mathbf{t}' en faisant du *filtrage* (*i.e.* avec `match ... with`)
- raisonner / prouver des propriétés sur les éléments de \mathbf{t} : « des preuves par induction ».

1.2 Preuves par induction sur un ensemble inductif.

Exemple 1.4. Intéressons nous à `nat`. Pour prouver $\forall x \in \mathbf{nat}, \mathcal{P}(x)$, il suffit de prouver *deux* choses (parce que l'on a deux constructeurs à l'ensemble `nat`) :

1. on doit montrer $\mathcal{P}(0)$;
2. et on doit montrer $\mathcal{P}(S\ n)$ en supposant l'*hypothèse d'induction* $\mathcal{P}(n)$.

Remarque 1.1. Dans le cas général, pour prouver $\forall x \in \mathbf{t}, \mathcal{P}(x)$, il suffit de prouver les n propriétés (n est le nombre de constructeurs de l'ensemble \mathbf{t}), où la i -ème propriété s'écrit :

On montre $\mathcal{P}(C_i(x_1, \dots, x_n))$ avec les hypothèses d'inductions $\mathcal{P}(x_j)$ lorsque $u_j^i = \mathbf{t}$.

Exemple 1.5. Avec le type `t2` défini dans l'exemple 1.2, on a trois constructeurs, donc trois cas à traiter dans une preuve par induction. Le second cas s'écrit :

On suppose $\mathcal{P}(x_1)$ et $\mathcal{P}(x_3)$ comme hypothèses d'induction, et on montre $\mathcal{P}(N2(x_1, k, x_3))$, où l'on se donne $k \in \mathbf{nat}$.

Exemple 1.6. On pose la fonction `red` définie par le code ci-dessous.

```

let rec red k ℓ = match ℓ with
| Nil -> Nil
| Cons(x, ℓ) -> let ℓ'' = red k ℓ'' in
                 if x = k then ℓ''
                 else Cons(x, ℓ'')

```

Code 1.3 | Fonction de filtrage d'une liste

Cette fonction permet de supprimer toutes les occurrences de k dans une liste ℓ .

Démontrons ainsi la propriété

$$\forall \ell \in \text{nlist}, \underbrace{\forall k \in \text{nat}, \text{size}(\text{red } k \ell) \leq \text{size } \ell}_{\mathcal{P}(\ell)}.$$

Pour cela, on procède par induction. On a *deux* cas.

1. Cas Nil : $\forall k \in \text{nat}, \text{size}(\text{red } k \text{ Nil}) \leq \text{size Nil}$;
2. Cas Cons(x, ℓ') : on suppose

$$\forall k \in \text{nat}, \text{size}(\text{red } k \ell) \leq \text{size } \ell,$$

et on veut montrer que

$$\forall k \in \text{nat}, \text{size}(\text{red } k \text{ Cons}(x, \ell')) \leq \text{size Cons}(x, \ell'),$$

ce qui demandera deux sous-cas : si $x = k$ et si $x \neq k$.

1.3 Définitions inductives de relations.

Dans ce cours, les relations définies par inductions représenteront des propriétés sur des programmes.

Un premier exemple : notations et terminologies.

Une relation est un sous-ensemble d'un produit cartésien. Par exemple, la relation $\leq \subseteq \text{nat} * \text{nat}$ est une relation binaire. Cette relation re-

présente \leq , « *lesser than or equal to* » en anglais.

Notation. On note $\text{le}(n, k)$ dès lors que l'on a $(n, k) \in \text{le}$.

Pour définir cette relation, on peut écrire :

Soit $\text{le} \subseteq \text{nat} * \text{nat}$ la relation qui vérifie :

1. $\forall n \in \text{nat}, \text{le}(n, n)$;
2. $\forall (n, k) \in \text{nat} * \text{nat}$, si $\text{le}(n, k)$ alors $\text{le}(n, S k)$.

mais, on écrira plutôt :

Soit $\text{le} \subseteq \text{nat} * \text{nat}$ la relation définie (inductivement) à partir des règles d'inférence suivantes :

$$\frac{}{\text{le}(n, n)} \mathcal{L}_1 \qquad \frac{\text{le}(n, k)}{\text{le}(n, S k)} \mathcal{L}_2 .$$

Remarque 1.2. \triangleright Dans la définition par règle d'inférence, chaque règle a *une* conclusion de la forme $\text{le}(\cdot, \cdot)$.

- \triangleright Les *métavariabes* n et k sont quantifiées universellement de façon implicite.

Définition 1.3. On appelle *dérivation* ou *preuve* un arbre construit en appliquant les règles d'inférence (ce qui fait intervenir l'*instanciation des métavariabes*) avec des axiomes aux feuilles.

Exemple 1.7. Pour démontrer $\text{le}(2, 4)$, on réalise la dérivation ci-dessous.

$$\frac{}{\text{le}(2, 2)} \mathcal{L}_1$$

$$\frac{\text{le}(2, 2)}{\text{le}(2, 3)} \mathcal{L}_2$$

$$\frac{\text{le}(2, 3)}{\text{le}(2, 4)} \mathcal{L}_2$$

Exemple 1.8. On souhaite définir une relation triée sur nlist . Pour

cela, on pose les trois règles ci-dessous :

$$\frac{}{\text{triée Nil}} \mathcal{T}_1 \quad \frac{}{\text{triée Cons}(x, \text{Nil})} \mathcal{T}_2 ,$$

$$\frac{\text{le}(x, y) \quad \text{triée Cons}(x, \text{Nil})}{\text{triée Cons}(x, \text{Cons}(y, \ell))} \mathcal{T}_3 .$$

Ceci permet de dériver, modulo quelques abus de notations, que la liste [1;3;4] est triée :

$$\frac{\frac{\frac{1 \leq 1}{\mathcal{L}_1} \quad \frac{3 \leq 3}{\mathcal{L}_1}}{\frac{1 \leq 2}{\mathcal{L}_2} \quad \frac{3 \leq 4}{\mathcal{L}_2}} \quad \frac{}{\text{triée [4]}} \mathcal{R}_2}{\frac{1 \leq 3}{\mathcal{L}_2} \quad \text{triée [3;4]}} \mathcal{R}_3$$

$$\frac{}{\text{triée [1;3;4]}} \mathcal{R}_3 .$$

Les parties en bleu de l'arbre ne concernent pas la relation *triée*, mais la relation *le*.

Exemple 1.9. On définit la relation *mem* d'appartenance à une liste. Pour cela, on définit $\text{mem} \subseteq \text{nat} * \text{nlist}$ par les règles d'inférences :

$$\frac{}{\text{mem}(k, \text{Cons}(k, \ell))} \mathcal{M}_1 \quad \frac{\text{mem}(k, \ell)}{\text{mem}(k, \text{Cons}(x, \ell))} \mathcal{M}_2 .$$

On peut constater qu'il y a plusieurs manières de démontrer

$$\text{mem}(0, [0;1;0]).$$

Ceci est notamment dû au fait qu'il y a deux '0' dans la liste.

Remarque 1.3. Attention! Dans les prémisses d'une règle, on ne peut pas avoir « $\neg r(\dots)$ ». Les règles ne peuvent qu'être « constructive », donc pas de négation.

Exemple 1.10. On définit la relation $\text{ne} \subseteq \text{nat} * \text{nat}$ de non égalité entre deux entiers.

On pourrait imaginer créer une relation d'égalité et de définir ne comme sa négation. Mais non, c'est ce que nous dit la remarque 1.3.

On peut cependant définir la relation ne par :

$$\frac{}{\text{ne}(\mathbb{Z}, \mathbb{S} k)} \mathcal{N}_1 \quad \frac{}{\text{ne}(\mathbb{S} n, \mathbb{Z})} \mathcal{N}_2 \quad \frac{\text{ne}(n, k)}{\text{ne}(\mathbb{S} n, \mathbb{S} k)} \mathcal{N}_3 .$$

Il est également possible de définir ne à partir de la relation le .

Exemple 1.11. En utilisant la relation ne (définie dans l'exemple 1.10), on peut revenir sur la relation d'appartenance et définir une relation alternative à celle de l'exemple 1.9. En effet, soit la relation mem' définie par les règles d'inférences ci-dessous :

$$\frac{}{\text{mem}'(n, \text{Cons}(n, \ell))} \mathcal{M}'_1 \quad \frac{\text{mem}'(n, \ell) \quad \text{ne}(k, n)}{\text{mem}'(n, \text{Cons}(k, \ell))} \mathcal{M}'_2 .$$

Il est (*sans doute ?*) possible de montrer que :

$$\forall (n, \ell) \in \text{nat} * \text{nlis}, \text{mem}(n, \ell) \iff \text{mem}'(n, \ell).$$

Remarque 1.4. Dans le cas général, une définition inductive d'une relation Rel , c'est k règles d'inférences de la forme :

$$\frac{H_1 \quad \dots \quad H_n}{\text{Rel}(x_1, \dots, x_m)} \mathcal{R}_i ,$$

où chaque H_j est :

- ▷ soit $\text{Rel}(\dots)$;

- ▷ soit une autre relation pré-existante (c.f. la définition de triée dans l'exemple 1.8).

On appelle les H_j les *prémisses*, et $\text{Rel}(x_1, \dots, x_m)$ la *conclusion*. Elles peuvent faire intervenir des *métavariabes*.

1.4 Preuves par induction sur une relation inductive.

On souhaite établir une propriété de la forme

$$\forall(x_1, \dots, x_m), \text{Rel}(x_1, \dots, x_m) \implies \mathcal{P}(x_1, \dots, x_m).$$

Pour cela, on établit autant de propriétés qu'il y a de règles d'inférences sur la relation Rel . Pour chacune de ces propriétés, on a une hypothèse d'induction pour chaque prémisses de la forme $\text{Rel}(\dots)$.

Exemple 1.12 (Induction sur la relation le.). Pour prouver une propriété

$$\forall(n, k) \in \text{nat} * \text{nat}, \text{le}(n, k) \implies \mathcal{P}(n, k),$$

il suffit d'établir *deux* propriétés :

1. $\forall n, \mathcal{P}(n, n)$;
2. pour tout (n, k) , montrer $\mathcal{P}(n, S k)$ en supposant $\mathcal{P}(n, k)$.

Exemple 1.13. Supposons que l'on ait une fonction ayant pour signature $\text{sort} : \text{nlist} \rightarrow \text{nlist}$ qui trie une nlist . On souhaite démontrer la propriété :

$$\forall \ell \in \text{nlist}, \text{triée}(\ell) \implies \text{sort}(\ell) = \ell.$$

On considère deux approches pour la démonstration : par induction sur ℓ et par induction sur la relation triée .

1. par induction sur la liste ℓ , il y a *deux* cas à traiter :

- ▷ montrer que $\text{triée}(\text{Nil}) \implies \text{sort}(\text{Nil}) = \text{Nil}$,
- ▷ montrer que :

$$\text{triée}(\text{Cons}(n, \ell)) \implies \text{sort}(\text{Cons}(n, \ell)) = \text{Cons}(n, \ell);$$

2. par induction sur la relation $\text{triée}(\ell)$, il y a *trois* cas à traiter :

- ▷ montrer $\text{sort}(\text{Nil}) = \text{Nil}$,
- ▷ montrer $\text{sort}(\text{Cons}(n, \text{Nil})) = \text{Cons}(n, \text{Nil})$,
- ▷ montrer $\text{sort}(\text{Cons}(x, \text{Cons}(y, \ell))) = \text{Cons}(x, \text{Cons}(y, \ell))$,
en supposant :
 - $\text{triée}(\text{Cons}(y, \ell))$ et $\mathcal{P}(\text{Cons}(y, \ell))$, pour la première prémisse ;
 - $\text{le}(x, y)$, pour la seconde prémisse.

2 Théorèmes de point fixe.

Sommaire.

2.1 Définitions inductives de relations.	16
2.2 Définitions inductives d'ensembles.	19
2.3 Preuves par induction sur un ensemble inductif.	20
2.4 Preuves par induction sur une relation inductive.	21
2.4.1 Une première approche...	21
2.4.2 Une approche plus astucieuse...	22
2.5 Domaines et points fixes.	23

Dans cette section, on va formaliser les raisonnements que l'on a réalisés en section 1 à l'aide du théorème de Knaster-Tarski.

Définition 2.1. Soit E un ensemble, une relation $\mathcal{R} \subseteq E^2$ est un *ordre partiel* si \mathcal{R} est :

- ▷ réflexive : $\forall x \in E, x \mathcal{R} x$;
- ▷ transitive : $\forall x, y, z \in E, (x \mathcal{R} y \text{ et } y \mathcal{R} z) \implies x \mathcal{R} z$;
- ▷ antisymétrique : $\forall x, y \in E, (x \mathcal{R} y \text{ et } y \mathcal{R} x) \implies x = y$.

Exemple 2.1. Dans l'ensemble $E = \mathbb{N}$, les relations \leq et $|$ (division) sont des ordres partiels.

Définition 2.2. Soit (E, \sqsubseteq) un ordre partiel.

- ▷ Un *minorant* d'une partie $A \subseteq E$ est un $m \in E$ tel que

$$\forall x \in A, m \sqsubseteq x.$$

- ▷ Un *majorant* d'une partie $A \subseteq E$ est un $m' \in E$ tel que

$$\forall x \in A, x \sqsubseteq m'.$$

- ▷ Un *treillis complet* est un ordre partiel (E, \sqsubseteq) tel que toute partie $A \subseteq E$ admet un *plus petit majorant*, noté $\bigsqcup A$, et un *plus grand minorant*, noté $\bigsqcap A$.

Remarque 2.1. ▷ Pour tout minorant m de A , on a $m \sqsubseteq \bigsqcap A$.

- ▷ Pour tout majorant m' de A , on a $\bigsqcup A \sqsubseteq m'$.

- ▷ Un minorant/majorant de A n'est pas nécessairement dans l'ensemble A . Ceci est notamment vrai pour $\bigsqcap A$ et $\bigsqcup A$.

Notation. On note généralement $\perp = \bigsqcap E$, et $\top = \bigsqcup E$.

Exemple 2.2. ▷ L'ensemble (\mathbb{N}, \leq) n'est pas un treillis complet : si A est infini, il n'admet pas de plus petit majorant.

- ▷ L'ensemble $(\mathbb{N} \cup \{\infty\}, \leq)$ est un treillis complet avec la convention $\forall n \in \mathbb{N}, n \leq \infty$.

- ▷ L'ensemble $(\mathbb{N}, |)$ est un treillis complet :

- pour $A \subseteq \mathbb{N}$ fini, on a

$$\bigsqcup A = \text{ppcm } A \quad \text{et} \quad \bigsqcap A = \text{pgcd } A;$$

- pour $A \subseteq \mathbb{N}$ infini, les relations ci-dessus restent valables avec la convention :

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad n \mid 0.$$

Exemple 2.3 (Exemple très important de treillis complet).

Soit E_0 un ensemble. Alors l'ensemble $(\wp(E_0), \subseteq)$ des parties de E_0 est un treillis complet. En particulier, on a :

$$\prod = \bigcap, \quad \sqcup = \bigcup, \quad \perp = \emptyset \quad \text{et} \quad \top = E_0.$$

Théorème 2.1 (Knaster-Tarski). Soit (E, \subseteq) un treillis complet. Soit f une fonction croissante de E dans E .¹ On considère l'ensemble

$$F_f = \{x \in E \mid f(x) \subseteq x\},$$

l'ensemble des *prépoints fixes* de f . Posons $m = \prod F_f$. Alors, m est un point fixe de f , i.e. $f(m) = m$.

Preuve. Soit $y \in F_f$, alors $m \subseteq y$, et par croissance de f , on a ainsi $f(m) \subseteq f(y)$, ce qui implique $f(m) \subseteq y$ par transitivité (et car $y \in F_f$). D'où, $f(m)$ est un minorant de F_f .

Or, par définition, $f(m) \subseteq m$, et par croissance $f(f(m)) \subseteq f(m)$, ce qui signifie que $f(m) \in F_f$. On en déduit $m \subseteq f(m)$.

Par antisymétrie, on en conclut que $f(m) = m$. □

À la suite de ce théorème, on peut formaliser les raisonnements que l'on a réalisé en section 1. Pour cela, il nous suffit d'appliquer le théorème 2.1 de Knaster-Tarski (abrégé en « théorème K-T »).

2.1 Définitions inductives de relations.

Remarque 2.2. Pour justifier la définition des relations, on applique le théorème K-T. En effet, on part de $E = E_1 * \dots * E_n$. Les relations sont des sous-ensembles de E , on travaille donc dans le treillis complet $(\wp(E), \subseteq)$. On se donne une définition inductive d'une relation $\text{Rel} \subseteq E$. Pour cela, on s'appuie sur les règles

1. Ceci signifie que $\forall a, b \in E, \quad a \subseteq b \implies f(a) \subseteq f(b)$.

d'inférences et on associe à chaque \mathcal{R}_i une fonction

$$f_i : \wp(E) \rightarrow \wp(E).$$

On montre (constate) que les f_i définies sont croissantes. Enfin, on pose pour $A \subseteq E$,

$$f(A) = f_1(A) \cup \dots \cup f_k(A).$$

La fonction $f \mapsto f(A)$ est croissante.

Par définition, Rel est défini comme le plus petit (pré)-point fixe de la fonction f , qui existe par le théorème K-T (théorème 2.1).

Exemple 2.4. Définissons le $\subseteq \text{nat} * \text{nat}$. On rappelle les règles d'inférences pour cette relation :

$$\frac{}{\text{le}(n, n)} \mathcal{L}_1 \quad \frac{\text{le}(n, k)}{\text{le}(n, S k)} \mathcal{L}_2.$$

Avec un ensemble $A \subseteq \text{nat} * \text{nat}$, on définit

$$f_1(A) = \{(n, n) \mid n \in \text{nat}\},$$

$$f_2(A) = \{(n, S k) \mid (n, k) \in A\};$$

et on pose enfin

$$f(A) = f_1(A) \cup f_2(A).$$

La définition formelle de la relation le est le plus petit point fixe de f .

Exemple 2.5 (Suite de l'exemple 1.8). Définissons triée $\subseteq \text{nlist}$. On rappelle les règles d'inférences pour cette relation :

$$\frac{}{\text{triée Nil}} \mathcal{T}_1 \quad \frac{}{\text{triée Cons}(x, \text{Nil})} \mathcal{T}_2,$$

$$\frac{\text{le}(x, y) \quad \text{triée Cons}(x, \text{Nil})}{\text{triée Cons}(x, \text{Cons}(y, \ell))} \mathcal{T}_3.$$

Avec un ensemble $A \subseteq \text{nlist}$, on définit

$$\begin{aligned} f_1(A) &= \{\text{Nil}\}, \\ f_2(A) &= \{\text{Cons}(k, \text{Nil}) \mid k \in \text{nat}\}, \\ f_3(A) &= \left\{ \text{Cons}(x, \text{Cons}(y, \ell)) \mid \begin{array}{l} \text{Cons}(y, \ell) \in A \\ \text{le}(x, y) \end{array} \right\}, \end{aligned}$$

et on pose enfin

$$f(A) = f_1(A) \cup f_2(A).$$

La définition formelle de la relation le est le plus petit point fixe de f .

Remarque 2.3. Dans les exemples ci-avant, même si l'on ne l'a pas précisé, les fonctions f_i sont bien croissantes pour l'inclusion \subseteq . C'est ceci qui assure l'application du théorème K-T (théorème 2.1).

Comme dit dans la remarque 1.3, on ne définit pas de règles d'induction de la forme

$$\frac{\cancel{\text{Rel}(x'_1, \dots, x'_n)}}{\cancel{\text{Rel}(x_1, \dots, x_n)}} \longrightarrow \text{C'est interdit !}$$

En effet, la fonction f définie n'est donc plus croissante.

Remarque 2.4. Une relation R définie comme le plus petit point fixe d'une fonction f vérifie, mais on ne demande en rien que l'on ait $A \subseteq f(A)$ quel que soit $A \subseteq E$. En effet, pour

$$f(\{(3, 2)\}) = \{(n, n) \mid n \in \text{nat}\} \cup \{(3, 1)\}$$

ne vérifie pas cette propriété.

2.2 Définitions inductives d'ensembles.

Exemple 2.6. On reprend le type t_2 défini à l'exemple 1.2 :

```

type t2 =
  | F
  | N2 of (t * nlist * t)
  | N3 of (t * nat * t * nat * t)

```

Code 2.1 | *Un exemple de type*

On le définit en utilisant le théorème K-T (théorème 2.1) en posant :

$$\begin{aligned}
 f_1(A) &= \{F\} \\
 f_2(A) &= \{(x, \ell, y) \mid \ell \in \text{nlist et } (x, y) \in A^2\} \\
 f_3(A) &= \left\{ (x, k_1, y, k_2, z) \mid \begin{array}{l} (x, y, z) \in A^3 \\ (k_1, k_2) \in \text{nat}^2 \end{array} \right\},
 \end{aligned}$$

puis, quel que soit A ,

$$f(A) = f_1(A) \cup f_2(A) \cup f_3(A).$$

On pose ensuite t_2 comme le plus petit point fixe de f .

Exemple 2.7. Avec $\text{nat} = \{Z, S Z, S S Z, \dots\}$, on utilise

$$f(A) = \{Z\} \cup \{S n \mid n \in A\},$$

et on pose nat le plus petit point fixe de f .

Et si on retire le cas de base? Que se passe-t-il? On pose la fonction

$$f'(A) = \{S n \mid n \in A\}.$$

Le plus petit point fixe de f est l'ensemble vide \emptyset . On ne définit donc pas les entiers naturels.

Remarque 2.5. Après quelques exemples, il est important de se demander comment f est définie. C’est une fonction de la forme

$$f : \wp(\boxed{?}) \rightarrow \wp(\boxed{?}).$$

Quel est l’ensemble noté « $\boxed{?}$ » ? Quel est l’ensemble *ambient* ?

La réponse est : c’est l’ensemble des arbres étiquetés par des chaînes de caractères.

Remarque 2.6. Pour définir inductivement un relation, on peut considérer qu’on construit un ensemble de dérivation.

Par exemple, pour le , on aurait

$$f_2(A) = \left\{ \frac{\delta}{le(n, S \ k)} \mid \begin{array}{l} \delta \text{ est une dérivation de } le(n, k) \text{ i.e.,} \\ \delta \text{ est une dérivation dont } le(n, k) \text{ est} \\ \text{à la racine} \end{array} \right\}.$$

2.3 Preuves par induction sur un ensemble inductif.

Remarque 2.7. Soit t un ensemble défini par induction par les constructeurs C_1, \dots, C_n . On pose f tel que t est le plus petit pré-point fixe de f .

On veut montrer $\forall x \in t, \mathcal{P}(x)$. Pour cela, on pose

$$A = \{x \in t \mid \mathcal{P}(x)\},$$

et on montre que $f(A) \subseteq A$, i.e. A est un pré-point fixe de f . Ceci implique, par définition de t , que $t \subseteq A$, d’où

$$\forall x, x \in t \implies \mathcal{P}(x).$$

Exemple 2.8. Expliquons ce que veut dire « montrer $f(A) \subseteq A$ » sur un exemple.

Pour `nlist`, on pose deux fonctions

$$\begin{aligned} f_1(A) &= \{\text{Nil}\} \\ f_2(A) &= \{\text{Cons}(k, \ell) \mid \ell \in A\} \\ &\quad \cdot \end{aligned}$$

Pour montrer $f(A) \subseteq A$, il y a *deux* cas :

- ▷ (pour f_1) montrer $\mathcal{P}(\text{Nil})$;
- ▷ (pour f_2) avec l'hypothèse d'induction $\mathcal{P}(\ell)$, et $k \in \text{nat}$, montrer $\mathcal{P}(\text{Cons}(n, \ell))$.

2.4 Preuves par induction sur une relation inductive.

2.4.1 Une première approche...

Remarque 2.8. Soit `Rel` une relation définie comme le plus petit (pré)point fixe d'une fonction f , associée aux k règles d'inférences $\mathcal{R}_1, \dots, \mathcal{R}_k$. On veut montrer que

$$\forall (x_1, \dots, x_m) \in E, \quad \text{Rel}(x_1, \dots, x_m) \implies \mathcal{P}(x_1, \dots, x_m).$$

Pour cela, on pose $A = \{(x_1, \dots, x_m) \in E \mid \mathcal{P}(x_1, \dots, x_m)\}$, et on montre que $f(A) \subseteq A$, *i.e.* que A est un prépoint fixe de f . Ainsi, on aura $\text{Rel} \subseteq A$ et on aura donc montré

$$\forall (x_1, \dots, x_m) \in E, \quad \text{Rel}(x_1, \dots, x_m) \implies \mathcal{P}(x_1, \dots, x_m).$$

Exemple 2.9. Pour le, prouver $f(A) \subseteq A$ signifie prouver deux propriétés :

1. $\forall n \in \text{nat}, \mathcal{P}(n)$;
2. $\forall (n, k) \in \text{nat}^2, \underbrace{\mathcal{P}(n, k)}_{\text{hyp. ind.}} \implies \mathcal{P}(n, \mathbf{S} k)$

Exemple 2.10. Pour triée, on a *trois* propriétés à prouver :

1. $\mathcal{P}(\text{Nil})$;
2. $\forall k \in \text{nat}, \mathcal{P}(\text{Cons}(k, \text{Nil}))$;
3. $\forall (x, y) \in \text{nat}^2, \forall \ell \in \text{nlst},$

$$\underbrace{\mathcal{P}(\text{Cons}(y, \ell))}_{\text{hyp.ind}} \wedge \text{le}(x, y) \implies \mathcal{P}(\text{Cons}(x, \text{Cons}(y, \ell))).$$

Remarque 2.9. Remarquons que dans l'exemple 2.10 ci-dessus, dans le 3ème cas, on n'a pas d'hypothèse $\text{triée}(\text{Cons}(y, \ell))$. Ceci vient du fait que, dans la remarque 2.7, l'ensemble A ne contient pas que des listes triées. La contrainte de la relation n'a pas été appliquée, on n'a donc pas accès à cette hypothèse.

2.4.2 Une approche plus astucieuse...

Remarque 2.10. On modifie légèrement le raisonnement présenté en remarque 2.7. On pose

$$A' = \{(x_1, \dots, x_m) \in E \mid \text{Rel}(x_1, \dots, x_m) \wedge \mathcal{P}(x_1, \dots, x_m)\}.$$

On montre $f(A') \subseteq A'$ et donc, par définition de Rel , on aura l'inclusion $\text{Rel} \subseteq A'$. Avec ce raisonnement, on peut utiliser des hypothèses, comme montré dans les exemples 2.11 et 2.12. Le but de la preuve n'est donc plus $\mathcal{P}(\dots)$ mais $\text{Rel}(\dots) \wedge \mathcal{P}(\dots)$.

En rouge sont écrits les différences avec le raisonnement précédent.

Exemple 2.11 (Version améliorée de l'exemple 2.9). Pour le, prouver $f(A) \subseteq A$ signifie prouver deux propriétés :

1. $\forall n \in \text{nat}, \text{le}(n, n) \wedge \mathcal{P}(n)$;
2. $\forall (n, k) \in \text{nat}^2, \underbrace{\text{le}(n, k) \wedge \mathcal{P}(n, k)}_{\text{hyp. ind.}} \implies \text{le}(n, S k) \wedge \mathcal{P}(n, S k)$

Exemple 2.12 (Version améliorée de l'exemple 2.10). Pour triée, on a trois propriétés à prouver :

1. $\text{triée}(\text{Nil}) \wedge \mathcal{P}(\text{Nil})$;
2. $\forall k \in \text{nat}, \text{triée}(\text{Cons}(k, \text{Nil})) \wedge \mathcal{P}(\text{Cons}(k, \text{Nil}))$;
3. $\forall (x, y) \in \text{nat}^2, \forall \ell \in \text{nlist},$

$$\begin{array}{c}
 \text{hyp.ind} \\
 \overbrace{\text{triée}(\text{Cons}(y, \ell)) \wedge \mathcal{P}(\text{Cons}(y, \ell)) \wedge \text{le}(x, y)} \\
 \Downarrow \\
 \text{triée}(\text{Cons}(x, \text{Cons}(y, \ell))) \wedge \mathcal{P}(\text{Cons}(x, \text{Cons}(y, \ell)))
 \end{array}$$

2.5 Domaines et points fixes.

Définition 2.3. Soit (E, \sqsubseteq) un ordre partiel. Une chaîne infinie dans l'ensemble ordonné (E, \sqsubseteq) est une suite $(e_n)_{n \geq 0}$ telle que

$$e_0 \sqsubseteq e_1 \sqsubseteq e_2 \sqsubseteq \dots$$

On dit que (E, \sqsubseteq) est *complet* si pour toute chaîne infinie, il existe $\bigsqcup_{n \geq 0} e_n \in E$, un plus petit majorant dans E .

Si, de plus, E a un plus petit élément \perp , alors (E, \sqsubseteq) est un *domaine*.

Remarque 2.11. Un treillis complet est un domaine.

Théorème 2.2. Soit (E, \sqsubseteq) un domaine. Soit $f : E \rightarrow E$ continue :

- ▷ f est croissante ;
- ▷ pour toute chaîne infinie $(e_n)_{n \geq 0}$,

$$f\left(\bigsqcup_{n \geq 0} e_n\right) = \bigsqcup_{n \geq 0} f(e_n).$$

Les $(f(e_n))_{n \geq 0}$ forment une chaîne infinie par croissance de la fonction f .

On pose, quel que soit $x \in E$, $f^0(x) = x$, et pour tout entier $i \geq 0$, on définit $f^{i+1}(x) = f(f^i(x))$.

On pose enfin

$$\begin{aligned} \text{fix}(f) &= \bigsqcup_{n \geq 0} f^n(\perp) \\ &= \perp \sqcup f(\perp) \sqcup f^2(\perp) \sqcup \dots \end{aligned}$$

Alors, $\text{fix}(f)$ est le plus petit point fixe de f .

Preuve. La preuve viendra plus tard. □

Les définitions inductives par constructeurs ou règles d'inférences peuvent être définis par des fonctions continues. Et, on peut se placer dans le domaine $(\wp(E), \subseteq)$ pour définir les ensembles définis par inductions.

Exemple 2.13. Avec les listes d'entiers, on définit

$$\text{nat} = \underbrace{\emptyset}_{\perp} \cup \underbrace{\{\text{Nil}\}}_{f(\perp)} \cup \underbrace{\{\text{Cons}(k, \text{Nil}) \mid k \in \text{nat}\}}_{f^2(\perp)} \cup \dots$$

3 Les bases de Rocq.

3.1 Les définitions par induction : `Inductive`.

En Rocq (anciennement Coq), on peut définir des ensembles par induction. Pour cela, on utilise le mot `Inductive`.

Par exemple, pour définir un type de liste d'entiers, on utilise le code ci-dessous.

```
Inductive nlist : Set :=  
  | Nil : nlist  
  | Cons : nat → nlist → nlist.
```

Code 3.1 | *Définition du type nlist en Rocq*

En Rocq, au lieu de définir la fonction `Cons` comme une « fonction » de la forme `Cons : nat * nlist → nlist`, on la *curryfie* en une « fonction » de la forme `Cons : nat → nlist → nlist`. Les types définis par les deux versions sont isomorphes.

Pour définir une relation, on utilise aussi le mot clé `Inductive` :

```
Inductive le : nat → nat → Prop :=  
  | le_refl : forall n, le n n  
  | le_S : forall n k, le n k → le (S n) (S k).
```

Code 3.2 | *Définition de la relation le*

Aux types définis par induction, on associe un principe d'induction (qu'on voit avec `Print le_ind.` ou `Print nlist_ind.`). Ce principe d'induction permet de démontrer une propriété \mathcal{P} sur un ensemble/une relation définie par induction.

3.2 Quelques preuves avec Rocq.

On décide de prouver le lemme suivant avec Rocq.

“Lemme” 3.1. Soit ℓ une liste triée, et soient a et b deux entiers tels que $a \leq b$. Alors la liste $a :: b :: \ell$ est triée.

Pour cela, on écrit en Rocq :

```
Lemma exemple_triee :
  forall l, triée l →
    forall a b, le a b →
      triée (Cons a (Cons b l)).
```

Il ne reste plus qu'à prouver ce lemme. On commence la démonstration par introduire les variables et hypothèses : les variables l , a , b , et les hypothèses (H1) : $\text{triée } l$, et (H2) : $\text{le } a \ b$. On commence par introduire la liste l et l'hypothèse H1 et on s'occupera des autres un peu après.

```
Proof.
  intros l H1.
```

On décide de réaliser une preuve par induction sur la relation triée , qui est en hypothèse (H1).

```
induction H1.
```

Dans le cas d'une preuve par induction sur triée , on a *trois* cas.

- *Cas 1.* On se trouve dans le cas $l = \text{Nil}$. Pas trop de problèmes pour prouver que $[a;b]$ est triée avec l'hypothèse $a \leq b$. On introduit les variables et hypothèses a , b et H2.

```
- intros a b H2.
```

À ce moment de la preuve, l'objectif est de montrer :

$$\text{triée } \text{Cons}(a, \text{Cons}(b, \text{Nil})).$$

Pour cela, on utilise deux fois les propriétés de la relation triée :

```
apply t_cons.  
apply t_singl.
```

Notre objectif a changé, on doit maintenant démontrer le a b. C'est une de nos hypothèses, on peut donc utiliser :

```
assumption.
```

Ceci termine le cas 1.

- *Cas 2.* On se trouve dans le cas $1 = [k]$. On doit de démontrer que la liste $[a;b;k]$ est triée. On a l'hypothèse $a \leq b$, mais aucune hypothèse de la forme $b \leq k$. On est un peu coincé pour ce cas...

(Un jour je finirai d'écrire cette partie... Malheureusement, ce n'est pas aujourd'hui...)

4 Sémantique opérationnelle.

Sommaire.

4.1	Sémantique opérationnelle pour les expressions arithmétiques simples (EA).	29
4.1.1	Sémantique à grands pas sur EA.	30
4.1.2	Sémantique à petits pas sur EA.	31
4.1.3	Coïncidence entre grands pas et petits pas.	32
4.1.4	L'ensemble EA avec des erreurs à l'exécution.	34
4.1.5	Sémantique contextuelle pour EA.	35
4.2	Sémantique opérationnelle des expressions arithmétiques avec déclarations locales (LEA).	37
4.2.1	Sémantique à grands pas sur LEA.	38
4.2.2	Sémantique à petits pas sur LEA.	39
4.2.3	Sémantique contextuelle pour LEA.	40
4.2.4	Sémantique sur LEA avec environnement.	40
4.3	Un petit langage fonctionnel : FUN.	41
4.3.1	Sémantique opérationnelle « informelle-ment ».	42
4.3.2	Sémantique opérationnelle de FUN (version 1).	43

Depuis le début du cours, on s'est intéressé à la *méthode inductive*. On essaie d'appliquer cette méthode à « l'exécution » des « programmes ».

On définira un programme comme un ensemble inductif : un programme est donc une structure de donnée. L'exécution d'un programme sera décrit comme des relations inductives (essentiellement

binaires) sur les programmes. Définir ces relations, cela s'appelle la *sémantique opérationnelle*.

On considèrera deux sémantiques opérationnelles

- la sémantique à grands pas, où l'on associe un résultat à un programme ;
- la sémantique à petits pas, où l'on associe un programme « un peu plus tard » à un programme.

Notre objectif, dans un premier temps, est de définir OCaml, ou plutôt un plus petit langage fonctionnel inclus dans OCaml.

4.1 Sémantique opérationnelle pour les expressions arithmétiques simples (EA).

On se donne l'ensemble \mathbb{Z} (on le prend comme un postulat). On définit l'ensemble EA en Rocq par :

```
Inductive EA : Set :=
| Cst :  $\mathbb{Z} \rightarrow$  EA
| Add : EA  $\rightarrow$  EA  $\rightarrow$  EA.
```

Code 4.1 | *Définition des expressions arithmétiques simples*

Note 4.1. On se donne \mathbb{Z} et on note $k \in \mathbb{Z}$ (vu comme une métavariable). On définit (inductivement) l'ensemble EA des expressions arithmétiques, notées a, a', a_1, \dots par la grammaire

$$a ::= k \mid a_1 \oplus a_2.$$

Exemple 4.1. L'expression $\underline{1} \oplus (\underline{3} \oplus \underline{7})$ représente l'expression Rocq

$$\text{Add}(\text{Cst } 1, \text{Add}(\text{Cst } 3)(\text{Cst } 7)),$$

que l'on peut représenter comme l'arbre de syntaxe...

Remarque 4.1. Dans le but de définir un langage minimal, il n’y a donc pas d’intérêt à ajouter \ominus et \otimes , représentant la soustraction et la multiplication.

4.1.1 Sémantique à grands pas sur EA.

On définit la sémantique opérationnelle à grands pas pour EA. L’intuition est d’associer l’exécution d’un programme avec le résultat. On définit la relation d’évaluation $\Downarrow \subseteq \text{EA} * \mathbb{Z}$, avec une notation infixée, définie par les règles d’inférences suivantes :

$$\frac{}{\underline{k} \Downarrow k} \quad \text{et} \quad \frac{a_1 \Downarrow k_1 \quad a_2 \Downarrow k_2}{a_1 \oplus a_2 \Downarrow k} ,$$

où, dans la seconde règle d’inférence, $k = k_1 + k_2$. Attention, le $+$ est la somme dans \mathbb{Z} , c’est une opération *externalisée*. Vu qu’on ne sait pas comment la somme a été définie dans \mathbb{Z} (on ne sait pas si elle est définie par induction/point fixe, ou pas du tout), on ne l’écrit pas dans la règle d’inférence.

La forme générale des règles d’inférences est la suivante :

$$\text{Cond. App.} \quad \frac{P_1 \quad \dots \quad P_m}{C} \mathcal{R}_i$$

où l’on donne les conditions d’application (ou *side condition* en anglais). Les P_1, \dots, P_m, C sont des relations inductives, mais les conditions d’applications **ne sont pas** forcément inductives.

Exemple 4.2.

$$3 + 7 = 10 \quad \frac{\underline{3} \Downarrow 3 \quad \frac{2 + 5 = 7 \quad \frac{\underline{2} \Downarrow 2 \quad \underline{5} \Downarrow 5}{(2 \oplus 5) \Downarrow 7}}{\underline{3} \oplus (\underline{2} \oplus \underline{5}) \Downarrow 10}}{} .$$

4.1.2 Sémantique à petits pas sur EA.

On définit ensuite la sémantique opérationnelle à *petits pas* pour EA. L'intuition est de faire un pas exactement (la relation n'est donc pas réflexive) dans l'exécution d'un programme et, si possible, qu'elle soit déterministe.

Une relation *déterministe* (ou *fonctionnelle*) est une relation \mathcal{R} telle que, si $a \mathcal{R} b$ et $a \mathcal{R} c$ alors $b = c$.

La relation de réduction $\rightarrow \subseteq \text{EA} * \text{EA}$, notée infixé, par les règles d'inférences suivantes

$$\begin{array}{c}
 k = k_1 + k_2 \quad \frac{}{k_1 \oplus k_2 \rightarrow k} \mathcal{A}, \\
 \frac{a_2 \rightarrow a'_2}{a_1 \oplus a_2 \rightarrow a_1 \oplus a'_2} \mathcal{C}_d \quad \text{et} \quad \frac{a_1 \rightarrow a'_1}{a_1 \oplus k \rightarrow a'_1 \oplus k} \mathcal{C}_g.
 \end{array}$$

Il faut le comprendre par « quand c'est fini à droite, on passe à gauche ».

Les règles \mathcal{C}_g et \mathcal{C}_d sont nommées respectivement *règle contextuelle droite* et *règle contextuelle gauche*. Quand $a \rightarrow a'$, on dit que a se *réduit* à a' .

Remarque 4.2. La notation $k \not\rightarrow$ indique que, quelle que soit l'expression $a \in \text{EA}$, on n'a pas $k \rightarrow a$. Les constantes ne peuvent pas être exécutées.

Exercice 4.1. Et si on ajoute la règle

$$\frac{a_1 \rightarrow a'_1 \quad a_2 \rightarrow a'_2}{a_1 \oplus a_2 \rightarrow a'_1 \oplus a'_2},$$

appelée *réduction parallèle*, que se passe-t-il ?

Remarque 4.3. Il n'est pas possible de démontrer $\underline{2} \oplus (\underline{3} \oplus \underline{4}) \rightarrow \underline{9}$.
En effet, on réalise *deux* pas.

4.1.3 Coïncidence entre grands pas et petits pas.

On définit la clôture réflexive et transitive d'une relation binaire \mathcal{R} sur un ensemble E , notée \mathcal{R}^* . On la définit par les règles d'inférences suivantes :

$$\frac{}{x \mathcal{R}^* x} \quad \text{et} \quad \frac{x \mathcal{R} y \quad y \mathcal{R}^* z}{x \mathcal{R}^* z} .$$

Lemme 4.1. La relation \mathcal{R}^* est transitive.

Preuve. On démontre

$$\forall x, y \in E, \quad \text{si } x \mathcal{R}^* y \text{ alors } \underbrace{\forall z, y \mathcal{R}^* z \implies x \mathcal{R}^* z}_{\mathcal{P}(x,y)}$$

par induction sur $x \mathcal{R}^* y$. Il y a *deux* cas.

- ▷ *Réflexivité.* On a donc $x = y$ et, par hypothèse, $y \mathcal{R}^* z$.
- ▷ *Transitivité.* On sait que $x \mathcal{R} a$ et $a \mathcal{R}^* y$. De plus, on a l'hypothèse d'induction

$$\mathcal{P}(a, y) : \forall z, y \mathcal{R}^* z \implies a \mathcal{R}^* z.$$

Montrons $\mathcal{P}(x, y)$. Soit z tel que $y \mathcal{R}^* z$. Il faut donc montrer $x \mathcal{R}^* z$. On sait que $x \mathcal{R} a$ et, par hypothèse d'induction, $a \mathcal{R}^* z$. Ceci nous donne $x \mathcal{R}^* z$ en appliquant la seconde règle d'inférence.

□

Lemme 4.2. Quelles que soient a_2 et a'_2 , si $a_2 \rightarrow^* a'_2$, alors pour tout a_1 , on a $a_1 \oplus a_2 \rightarrow^* a_1 \oplus a'_2$.

Preuve. On procède par induction sur $a_2 \rightarrow^* a'_2$. Il y a *deux* cas.

1. On a $a'_2 = a_2$. Il suffit donc de montrer que l'on a

$$a_1 \oplus a_2 \rightarrow^* a_1 \oplus a_2,$$

ce qui est vrai par réflexivité.

2. On sait que $a_2 \rightarrow a$ et $a \rightarrow^* a'_2$. On sait de plus que

$$\forall a_1, \quad a_1 \oplus a \rightarrow^* a_1 \oplus a'_2$$

par hypothèse d'induction. On veut montrer que

$$\forall a_1, \quad a_1 \oplus a_2 \rightarrow^* a_1 \oplus a'_2.$$

On se donne a_1 . On déduit de $a_2 \rightarrow a$ que $a_1 \oplus a_2 \rightarrow a_1 \oplus a$ par \mathcal{C}_d . Par hypothèse d'induction, on a $a_1 \oplus a \rightarrow^* a_1 \oplus a'_2$. Par la seconde règle d'inférence, on conclut.

□

Lemme 4.3. Quelles que soient les expressions a_1 et a'_1 , si $a_1 \rightarrow^* a'_1$ alors, pour tout k , $a_1 \oplus k \rightarrow^* a'_1 \oplus k$. □

Attention, le lemme précédent est faux si l'on remplace k par une expression a_2 . En effet, a_2 ne peut pas être « spectateur » du calcul de a_1 .

Proposition 4.1. Soient a une expression et k un entier. On a l'implication

$$a \Downarrow k \implies a \rightarrow^* k.$$

Preuve. On le démontre par induction sur la relation $a \Downarrow k$. Il y a *deux* cas.

1. Dans le cas $a = k$, alors on a bien $k \rightarrow^* k$.
2. On sait que $a_1 \Downarrow k_1$ et $a_2 \Downarrow k_2$, avec $k = k_1 + k_2$. On a également deux hypothèses d'induction :

- ▷ $(H_1) : a_1 \rightarrow^* \underline{k}_1 ;$
- ▷ $(H_2) : a_2 \rightarrow^* \underline{k}_2 .$

On veut montrer $a_1 \oplus a_2 \rightarrow^* \underline{k}$, ce que l'on peut faire par :

$$a_1 \oplus a_2 \xrightarrow{(H_2)+\text{lemme 4.2}}^* a_1 \oplus \underline{k}_2 \xrightarrow{(H_1)+\text{lemme 4.3}}^* \underline{k}_1 \oplus \underline{k}_2 \xrightarrow{\text{sl}} \underline{k} .$$

□

Proposition 4.2. Soient a une expression et k un entier. On a l'implication

$$a \rightarrow^* \underline{k} \implies a \Downarrow k .$$

□

4.1.4 L'ensemble EA avec des erreurs à l'exécution.

On exécute des programmes de EA. On considère que $\underline{k}_1 \oplus \underline{k}_2$ s'évalue comme

$$\frac{(k_1 + k_2) \times k_2}{k_2} .$$

Le cas $k_2 = 0$ est une situation d'erreur, une « **situation catastrophique** ». (C'est une convention : quand un ordinateur divise par zéro, il explose!)

Relation à grands pas.

On note encore \Downarrow la relation d'évaluation sur $\text{EA} * \mathbb{Z}_\perp$, où l'on définit l'ensemble $\mathbb{Z}_\perp = \mathbb{Z} \cup \{\perp\}$. Le symbole \perp est utilisé pour représenter un cas d'erreur.

Les règles d'inférences définissant \Downarrow sont :

$$\frac{}{\underline{k} \Downarrow k} \qquad \frac{k = k_1 + k_2}{k \neq 0} \frac{a_1 \Downarrow k_1 \quad a_2 \Downarrow k_2}{a_1 \oplus a_2 \Downarrow k} \qquad \frac{a_1 \Downarrow k_1 \quad a_2 \Downarrow 0}{a_1 \oplus a_2 \Downarrow \perp} ,$$

et les règles de propagation du \perp :

$$\frac{a_1 \Downarrow \perp \quad (a_2 \Downarrow r)}{a_1 \oplus a_2 \Downarrow \perp} \quad \frac{(a_1 \Downarrow r) \quad a_2 \Downarrow \perp}{a_1 \oplus a_2 \Downarrow \perp} .$$

Relation à petits pas.

On (re)-définit la relation $\rightarrow \subseteq \text{EA} * \text{EA}_\perp$, où $\text{EA}_\perp = \text{EA} \cup \{\perp\}$, par les règles d'inférences

$$\begin{array}{c} \frac{k = k_1 + k_2}{k_2 \neq 0} \frac{}{\underline{k}_1 \oplus \underline{k}_2 \rightarrow \underline{k}} \quad a_2 \neq \perp \frac{a_2 \rightarrow a'_2}{a_1 \oplus a_2 \rightarrow a_1 \oplus a'_2} \\ a_1 \neq \perp \frac{a_1 \rightarrow a'_1}{a_1 \oplus \underline{k} \rightarrow a'_1 \oplus \underline{k}} \quad \frac{}{\underline{k}_1 \oplus \underline{0} \rightarrow \perp}, \end{array}$$

et les règles de propagation du \perp :

$$\frac{a_1 \rightarrow \perp}{a_1 \oplus \underline{k} \rightarrow \perp} \quad \text{et} \quad \frac{a_2 \rightarrow \perp}{a_1 \oplus a_2 \rightarrow \perp} .$$

Pour démontrer l'équivalence des relations grand pas et petits pas, ça semble un peu plus compliqué...

4.1.5 Sémantique contextuelle pour EA.

On définit la relation $\mapsto : \text{EA} \times \text{EA}$ par la règle :

$$k = k_1 + k_2 \frac{}{E[\underline{k}_1 \oplus \underline{k}_2] \mapsto E[\underline{k}]},$$

où E est un *contexte d'évaluation* que l'on peut définir par la grammaire

$$E ::= [] \mid \boxed{?} .$$

Le *trou* est une constante, notée $[]$ qui n'apparaît qu'une fois par contexte d'évaluation. Pour E un contexte d'évaluation et $a \in \text{EA}$, alors $E[a]$ désigne l'expression arithmétique obtenue en remplaçant le trou par a dans E .

Exemple 4.3. On note $E_0 = \underline{3} \oplus ([] \oplus \underline{5})$ et $a_0 = \underline{1} \oplus \underline{2}$. Alors

$$\underline{3} \oplus ((\underline{1} \oplus \underline{2}) \oplus \underline{5}).$$

Que faut-il mettre à la place de **?** ?

Exemple 4.4 (Première tentative). On pose

$$E ::= [] \mid \underline{k} \mid E_1 \oplus E_2.$$

Mais, ceci peut introduire *plusieurs* trous (voire aucun) dans un même contexte. C'est raté.

Exemple 4.5 (Seconde tentative). On pose

$$E ::= [] \mid a \oplus E \mid E \oplus a.$$

Mais, on pourra réduire une expression à droite avant de réduire à gauche. C'est encore raté.

Exemple 4.6 (Troisième (et dernière) tentative). On pose

$$E ::= [] \mid a \oplus E \mid E \oplus \underline{k}.$$

Là, c'est réussi !

Lemme 4.4. Pour toute expression arithmétique $a \in \mathbf{EA}$ qui n'est pas une constante, il existe un unique triplet (E, k_1, k_2) tel que

$$a = E[\underline{k}_1 \oplus \underline{k}_2].$$

Ceci permet de justifier la proposition suivante, notamment au niveau des notations.

Proposition 4.3. Pour tout a, a' , on a

$$a \rightarrow a' \quad \text{si, et seulement si,} \quad a \mapsto a'.$$

Preuve. Pour démontrer cela, on procède par double implication :

- ▷ « \implies » par induction sur $a \rightarrow a'$;
- ▷ « \impliedby » par induction sur E .

□

4.2 Sémantique opérationnelle des expressions arithmétiques avec déclarations locales (LEA).

On suppose donnés \mathbb{Z} les entiers relatifs et \mathcal{V} un ensemble infini de variables (d'identifiants/d'identificateurs/de noms).

On définit LEA par la grammaire suivante :

$$a ::= \underline{k} \mid a_1 \oplus a_2 \mid \text{let } x = a_1 \text{ in } a_2 \mid x,$$

où $x \in \mathcal{V}$ et $k \in \mathbb{Z}$.

En Rocq, on peut définir :

```
Inductive LEA : Set :=
| Cst : ℤ → LEA
| Add : LEA → LEA → LEA
| Let : ℳ → LEA → LEA → LEA
| Var : ℳ → LEA.
```

Code 4.2 | Définition inductive de LEA

Exemple 4.7. Voici quelques exemples d'expressions avec déclarations locales :

1. `let x = 3 in x ⊕ x;`
2. `let x = 2 in let y = x ⊕ 2 in x ⊕ y;`
3. `let x = (let y = 5 in y ⊕ y) in (let z = 6 in z ⊕ 2) ⊕ x;`

4. $\text{let } x = \underline{7} \oplus \underline{2} \text{ in } (\text{let } x = \underline{5} \text{ in } x \oplus x) \oplus x.$

4.2.1 Sémantique à grands pas sur LEA.

On définit une relation d'évaluation $\Downarrow : \text{LEA} * \mathbb{Z}^1$ définie par :

$$\frac{}{\underline{k} \Downarrow k} \quad k = k_1 + k_2 \quad \frac{a_1 \Downarrow k_1 \quad a_2 \Downarrow k_2}{a_1 \oplus a_2 \Downarrow k},$$

et on ajoute une règle pour le **let...in...** :

$$\frac{a_1 \Downarrow k_1 \quad a_2 [k_1/x] \Downarrow k_1}{(\text{let } x = a_1 \text{ in } a_2) \Downarrow k_2}.$$

On note ici $a[k/x]$ la substitution de \underline{k} à la place de x dans l'expression a . Ceci sera défini après.

Attention : on n'a pas de règles de la forme

~~$$\frac{}{x \Downarrow \boxed{?}},$$~~

les variables sont censées disparaître avant qu'on arrive à elles.

Définition 4.1. Soit $a \in \text{LEA}$. L'ensemble des *variables libres* d'une expression a noté $\mathcal{V}\ell(a)$, et est défini par induction sur a de la manière suivante :

- ▷ $\mathcal{V}\ell(\underline{k}) = \emptyset$;
- ▷ $\mathcal{V}\ell(x) = \{x\}$;
- ▷ $\mathcal{V}\ell(a_1 \oplus a_2) = \mathcal{V}\ell(a_1) \cup \mathcal{V}\ell(a_2)$;
- ▷ $\mathcal{V}\ell(\text{let } x = a_1 \text{ in } a_2) = \mathcal{V}\ell(a_1) \cup (\mathcal{V}\ell(a_2) \setminus \{x\})$.

1. On surcharge encore les notations.

Exemple 4.8.

$$\mathcal{V}\ell(\text{let } x = \underline{3} \text{ in let } y = x \oplus \underline{2} \text{ in } y \oplus (z \oplus \underline{15})) = \{z\}.$$

Définition 4.2. Une expression $a \in \text{LEA}$ est *close* si $\mathcal{V}\ell(a) = \emptyset$. On note $\text{LEA}_0 \subseteq \text{LEA}$ l'ensemble des expressions arithmétiques de closes.

Définition 4.3. Soient $a \in \text{LEA}$, $x \in \mathcal{V}$ et $k \in \mathbb{Z}$. On définit par induction sur a (*quatre cas*) le résultat de la *substitution* de x par \underline{k} dans a , noté $a[\underline{k}/x]$ de la manière suivante :

- ▷ $\underline{k}'[\underline{k}/x] = \underline{k}'$;
- ▷ $(a_1 \oplus a_2)[\underline{k}/x] = (a_1[\underline{k}/x]) \oplus (a_2[\underline{k}/x])$;
- ▷ $y[\underline{k}/x] = \begin{cases} \underline{k} & \text{si } x = y \\ y & \text{si } x \neq y ; \end{cases}$
- ▷ $(\text{let } y = a_1 \text{ in } a_2)[\underline{k}/x] = \begin{cases} \text{let } y = a_1[\underline{k}/x] \text{ in } a_2 & \text{si } x = y \\ \text{let } y = a_1[\underline{k}/x] \text{ in } a_2[\underline{k}/x] & \text{si } x \neq y. \end{cases}$

4.2.2 Sémantique à petits pas sur LEA.

On définit la relation $\rightarrow \subseteq \text{LEA} * \text{LEA}$ inductivement par :

$$\begin{aligned} & \frac{k = k_1 + k_2}{\underline{k}_1 \oplus \underline{k}_2 \rightarrow \underline{k}} \mathcal{A}, \\ & \frac{a_2 \rightarrow a'_2}{a_1 \oplus a_2 \rightarrow a_1 \oplus a'_2} \mathcal{C}_d \quad \text{et} \quad \frac{a_1 \rightarrow a'_1}{a_1 \oplus \underline{k} \rightarrow a'_1 \oplus \underline{k}} \mathcal{C}_g, \end{aligned}$$

puis les nouvelles règles pour le **let ... in ...** :

$$\frac{a_1 \rightarrow a'_1}{\text{let } x = a_1 \text{ in } a_2 \rightarrow \text{let } x = a'_1 \text{ in } a_2} \mathcal{C}_1$$

$$\overline{\text{let } x = \underline{k} \text{ in } a} \rightarrow a[\underline{k}/x].$$

On peut démontrer l'équivalence des sémantiques à grands pas et à petits pas.

4.2.3 Sémantique contextuelle pour LEA.

On définit les contextes d'évaluations par la grammaire suivante :

$$\begin{aligned} E ::= & \quad [] \\ & \quad | a \oplus E \\ & \quad | E \oplus \underline{k} \\ & \quad | \text{let } x = E \text{ in } a. \end{aligned}$$

On définit *deux* relations \mapsto_a et \mapsto par les règles :

$${}^{k = k_1 + k_2} \frac{}{\underline{k}_1 \oplus \underline{k}_2 \mapsto_a \underline{k}_2} \quad \frac{}{\text{let } x = \underline{k} \mapsto_a a[\underline{k}/x]},$$

et

$$\frac{a \mapsto_a a'}{E[a] \mapsto E[a']}.$$

4.2.4 Sémantique sur LEA avec environnement.

Définition 4.4. Soient A et B deux ensembles. Un *dictionnaire* sur (A, B) est une fonction partielle à domaine fini de A dans B .

Si D est un dictionnaire sur (A, B) , on note $D(x) = y$ lorsque D associe $y \in B$ à $x \in A$.

Le domaine d'un dictionnaire D est

$$\text{dom}(D) = \{x \in A \mid \exists y \in B, D(x) = y\}.$$

On note \emptyset le dictionnaire vide.

Pour un dictionnaire D sur (A, B) , deux éléments $x \in A$ et $y \in B$, on note $D[x \mapsto y]$ est le dictionnaire D' défini par

- ▷ $D'(x) = y$;
- ▷ $D'(z) = D(z)$ pour $z \in \text{dom}(D)$ tel que $z \neq x$.

On ne s'intéresse pas à la construction d'un tel type de donné, mais juste son utilisation.

On se donne un ensemble *Env* d'*environnements* notés $\mathcal{E}, \mathcal{E}', \dots$ qui sont des dictionnaires sur $(\mathcal{V}, \mathbb{Z})$.

Sémantique à grands pas sur LEA avec environnements.

On définit la relation $\Downarrow \subseteq \text{LEA} * \text{Env} * \mathbb{Z}$, noté $a, \mathcal{E} \Downarrow k$ (« a s'évalue en k dans \mathcal{E} ») défini par

$$\frac{}{k, \mathcal{E} \Downarrow k} \quad \frac{k = k_1 + k_2 \quad \frac{a_1, \mathcal{E} \Downarrow k_1 \quad a_2, \mathcal{E} \Downarrow k_2}{a_1 \oplus a_2, \mathcal{E} \Downarrow k}}{\mathcal{E}(x) = k \quad \frac{}{x, \mathcal{E} \Downarrow k},}$$

$$\frac{a_1, \mathcal{E} \Downarrow k_1 \quad a_2, \mathcal{E}[x \mapsto k_1] \Downarrow k_2}{\text{let } x = a_1 \text{ in } a_2 \Downarrow k_2} .$$

Remarque 4.4. ▷ Dans cette définition, on n'a pas de substitutions (c'est donc plus facile à calculer).

- ▷ Si $\mathcal{V}\ell(a) \subseteq \text{dom}(\mathcal{E})$, alors il existe $k \in \mathbb{Z}$ tel que $a, \mathcal{E} \Downarrow k$.
- ▷ On a $a \Downarrow k$ (sans environnement) si, et seulement si $a, \emptyset \Downarrow k$ (avec environnement).

Pour les petits pas avec environnements, c'est un peu plus compliqué... On verra ça en TD. (Écraser les valeurs dans un dictionnaire, ça peut être problématique avec les petits pas.)

4.3 Un petit langage fonctionnel : FUN.

On se rapproche de notre but final en considérant un petit langage fonctionnel, nommé FUN.

On se donne l'ensemble des entiers relatifs \mathbb{Z} et un ensemble infini de variables \mathcal{V} . L'ensemble des expressions de FUN, notées e , e' ou e_i , est défini par la grammaire suivante :

$$e ::= k \mid e_1 + e_2 \mid \underbrace{\text{fun } x \rightarrow e}_{\text{Fonction / Abstraction}} \mid \overbrace{e_1 \ e_2}^{\text{Application}} \mid x.$$

Note 4.2. On simplifie la notation par rapport à EA ou LEA : on ne souligne plus les entiers, on n'entoure plus les plus.

On notera de plus $e_1 \ e_2 \ e_3$ pour $(e_1 \ e_2) \ e_3$. Aussi, l'expression $\text{fun } x \ y \rightarrow e$ représentera l'expression $\text{fun } x \rightarrow (\text{fun } y \rightarrow e)$. On n'a pas le droit à plusieurs arguments pour une fonction, mais on applique la curryfication.

4.3.1 Sémantique opérationnelle « informellement ».

Exemple 4.9. Comment s'évalue $(\text{fun } x \rightarrow x + x)(7 + 7)$?

- ▷ D'une part, $7 + 7$ s'évalue en 14.
- ▷ D'autre part, $(\text{fun } x \rightarrow x + x)$ s'évalue en elle même.
- ▷ On procède à une substitution de $(x + x)[14/x]$ qui s'évalue en 28.

Exemple 4.10. Comment s'évalue l'expression

$$\overbrace{((\text{fun } f \rightarrow \underbrace{(\text{fun } x \rightarrow x + (f \ x))}_B)}^A \ \underbrace{(\text{fun } y \rightarrow y + y)}_C) \ 7 \ ?$$

On commence par évaluer A et C qui s'évaluent en A et C respectivement. On continue en calculant la substitution

$$(\text{fun } x \rightarrow x + (f \ x))[\text{fun } y \rightarrow y + y/f],$$

ce qui donne

$$(\text{fun } x \rightarrow x + ((\text{fun } y \rightarrow y + y) x)).$$

Là, on **ne simplifie pas**, car c'est du code *dans* une fonction.
On calcule ensuite la substitution

$$(x + ((\text{fun } y \rightarrow y + y) x))^{[7/x]},$$

ce qui donne

$$7 + ((\text{fun } y \rightarrow y + y) 7).$$

On termine par la substitution

$$(y + y)^{[7/y]} = 7 + 7.$$

On conclut que l'expression originelle s'évalue en 21.

Remarque 4.5. Dans FUN, le résultat d'un calcul (qu'on appellera *valeur*) n'est plus forcément un entier, ça peut aussi être une fonction.

L'ensemble des valeurs, notées v , est défini par la grammaire

$$v ::= k \mid \text{fun } x \rightarrow e.$$

LES FONCTIONS SONT DES VALEURS ! Et, le « contenu » la fonction n'est pas forcément une valeur.

On peut remarquer que l'ensemble des valeurs est un sous-ensemble des expressions de FUN.

4.3.2 Sémantique opérationnelle de FUN (version 1).

Définition 4.5. On définit l'ensemble des *variables libres* $\mathcal{V}\ell(e)$ d'une expression e par (on a 5 cas) :

$$\triangleright \mathcal{V}\ell(x) = \{x\};$$

- ▷ $\mathcal{Vl}(k) = \emptyset$;
- ▷ $\mathcal{Vl}(e_1 + e_2) = \mathcal{Vl}(e_1) \cup \mathcal{Vl}(e_2)$;
- ▷ $\mathcal{Vl}(e_1 e_2) = \mathcal{Vl}(e_1) \cup \mathcal{Vl}(e_2)$;
- ▷ $\mathcal{Vl}(\text{fun } x \rightarrow e) = \mathcal{Vl}(e) \setminus \{x\}$.²

On dit que e est *close* si $\mathcal{Vl}(e) = \emptyset$.

Définition 4.6. Pour $e \in \text{FUN}$, $x \in \mathcal{V}$ et v une valeur **close**, on définit la *substitution* $e[v/x]$ de x par v dans e par :

- ▷ $k[v/x] = k$;
- ▷ $y[v/x] = \begin{cases} v & \text{si } x = y \\ y & \text{si } x \neq y \end{cases}$;
- ▷ $(\text{fun } y \rightarrow e)[v/x] = \begin{cases} \text{fun } y \rightarrow e & \text{si } x = y \\ \text{fun } y \rightarrow e[v/x] & \text{si } x \neq y \end{cases}$;
- ▷ $(e_1 + e_2)[v/x] = (e_1[v/x]) + (e_2[v/x])$;
- ▷ $(e_1 e_2)[v/x] = (e_1[v/x]) (e_2[v/x])$.

Grands pas pour FUN.

On définit la relation \Downarrow sur couples (expression, valeur) par :

$$\begin{array}{c}
 k = k_1 + k_2 \quad \frac{e_1 \Downarrow k_1 \quad e_2 \Downarrow k_2}{e_1 + e_2 \Downarrow k} \quad \frac{}{v \Downarrow v} \\
 \frac{e_1 \Downarrow \text{fun } x \rightarrow e \quad e_2 \Downarrow v_2 \quad e[v_2/x] \Downarrow v}{e_1 e_2 \Downarrow v}.
 \end{array}$$

Remarque 4.6. Certaines expressions ne s'évaluent pas :

$$x \not\Downarrow \quad \text{et} \quad z + (\text{fun } x \rightarrow x) \not\Downarrow$$

2. L'expression $\text{fun } x \rightarrow e$ est un *lieur* : x est liée dans e .

par exemple.

Petits pas pour FUN.

On définit la relation $\rightarrow \subseteq \text{FUN} * \text{FUN}$ par :

$$\begin{array}{l}
 \frac{k = k_1 + k_2}{k_1 + k_2 \rightarrow k} \mathcal{R}_{\text{pk}} \qquad \frac{}{(\text{fun } x \rightarrow e) v \rightarrow e[v/x]} \mathcal{R}_{\beta} \\
 \\
 \frac{e_2 \rightarrow e'_2}{e_1 + e_2 \rightarrow e_1 + e'_2} \mathcal{R}_{\text{pd}} \qquad \frac{e_1 \rightarrow e'_1}{e_1 + k \rightarrow e'_1 + k} \mathcal{R}_{\text{pg}} \\
 \\
 \frac{e_2 \rightarrow e'_2}{e_1 e_2 \rightarrow e_1 e'_2} \mathcal{R}_{\text{ad}} \qquad \frac{e_1 \rightarrow e'_1}{e_1 v \rightarrow e'_1 v} \mathcal{R}_{\text{ag}}.
 \end{array}$$

Remarque 4.7. Il existe des expressions que l'on ne peut pas réduire :

1. $k \not\rightarrow$;
2. $(\text{fun } x \rightarrow x) \not\rightarrow$;
3. $e_1 + (\text{fun } x \rightarrow x) \not\rightarrow$;
4. $3 (5 + 7) \rightarrow 3 \ 12 \not\rightarrow$.

Dans les cas 1. et 2., c'est cohérent : on ne peut pas réduire des valeurs.

Lemme 4.5. On a

$$e \Downarrow v \quad \text{si, et seulement si,} \quad e \rightarrow^* v.$$

Remarque 4.8. Soit $e_0 = (\text{fun } x \rightarrow x \ x) (\text{fun } x \rightarrow x \ x)$. On remarque que $e_0 \rightarrow e_0$.

En FUN, il y a des divergences : il existe $(e_n)_{n \in \mathbb{N}}$ telle que l'on ait $e_n \rightarrow e_{n+1}$.

La fonction³ définie par \Downarrow est donc partielle.

Remarque 4.9 (Problème avec la substitution). On a la chaîne de réductions :

$$\begin{aligned}
 & ((\text{fun } y \rightarrow (\text{fun } x \rightarrow x + y)) (x + 7)) 5 \\
 (\star) \quad & \rightarrow (\text{fun } x \rightarrow x + (x + 7)) 5 \\
 & \rightarrow 5 + (5 + 7) \\
 & \rightarrow^* 17.
 \end{aligned}$$

Attention ! Ici, on a triché : on a substitué avec l'expression $x + 7$ mais ce n'est pas une valeur (dans la réduction (\star)) !

Mais, on a la chaîne de réductions

$$\begin{aligned}
 & (\text{fun } f \rightarrow (\text{fun } x \rightarrow (f \ 3) + x)) (\text{fun } t \rightarrow x + 7) 5 \\
 & \rightarrow (\text{fun } x \rightarrow ((\text{fun } t \rightarrow x + 7) \ 3) + x) 5 \\
 & \rightarrow (\text{fun } x \rightarrow ((\text{fun } t \rightarrow x + 7) \ 3) + x) 5.
 \end{aligned}$$

Et là, c'est le drame, on a **capturé la variable libre**. D'où l'hypothèse de v close dans la substitution.

Remarque 4.10. Les relations \Downarrow et \rightarrow sont définies sur des expressions **close**. Et on a même $\rightarrow \subseteq \text{FUN}_0 * \text{FUN}_0$.⁴

Lemme 4.6. \triangleright Si v est close et si $x \notin \mathcal{V}\ell(e)$ alors $e[v/x] = e$.

\triangleright Si v est close, $\mathcal{V}\ell(e[v/x]) = \mathcal{V}\ell(e) \setminus \{x\}$. \square

Lemme 4.7. Si $e \in \text{FUN}_0$ et $e \rightarrow e'$ alors $e' \in \text{FUN}_0$.

Preuve. Montrons que, quelles que soient e et e' , on a : si $e \rightarrow e'$ alors $(e \in \text{FUN}_0) \implies (e' \in \text{FUN}_0)$ On procède par induction sur

3. Pour indiquer cela, il faudrait démontrer que la relation \Downarrow est déterministe.

4. Il faudrait ici justifier que la réduction d'une formule close est close. C'est ce que nous allons justifier.

la relation $e \rightarrow e'$. Il y a 6 cas :

1. Pour \mathcal{R}_β , on suppose ($\mathbf{fun} x \rightarrow e$) v est close, alors

▷ ($\mathbf{fun} x \rightarrow e$) est close ;

▷ v est close.

On sait donc que $\mathcal{V}\ell(e) \subseteq \{x\}$, d'où par le lemme précédent, $\mathcal{V}\ell(e[v/x]) = \emptyset$ et donc $e[v/x]$ est close.

2–6. Pour les autres cas, on procède de la même manière. □

Remarque 4.11. De même, si $e \Downarrow v$ où e est close, alors v est close.

Les relations \Downarrow et \rightarrow sont définies sur les expressions et les valeurs closes.

Définition 4.7 (Définition informelle de l' α -conversion). On définit l' α -conversion, notée $e =_\alpha e'$: on a $\mathbf{fun} x \rightarrow e =_\alpha \mathbf{fun} y \rightarrow e'$ si, et seulement si, e' s'obtient en remplaçant x par y dans e à condition que $y \notin \mathcal{V}\ell(e)$.⁵

On étend $e =_\alpha e'$ à toutes les expressions : « on peut faire ça partout ».

Exemple 4.11 (*Les variables liées sont muettes.*). On a :

$$\begin{aligned} \mathbf{fun} x \rightarrow x + z &=_\alpha \mathbf{fun} y \rightarrow y + z \\ &=_\alpha \mathbf{fun} t \rightarrow t + z \\ &\neq_\alpha \mathbf{fun} z \rightarrow z + z. \end{aligned}$$

L'intuition est, quand on a $\mathbf{fun} x \rightarrow e$ et qu'on a besoin de renommer la variable x , pour cela on prend $x' \notin \mathcal{V}\ell(e)$.

5. C'est une « variable fraîche ».

“Lemme” 4.1. Si $E_0 \subseteq \mathcal{V}$ est un ensemble fini de variables, alors il existe $z \notin E_0$ et $e' \in \text{FUN}$ tel que $\text{fun } x \rightarrow e =_\alpha \text{fun } z \rightarrow e'$.

Remarque 4.12 (Fondamental). En fait FUN désigne l’ensemble des expressions décrites par la grammaire initiale *quotientée* par α -conversion.

Remarque 4.13. On remarque que

$$(e =_\alpha e') \implies \mathcal{V}\ell(e) = \mathcal{V}\ell(e').$$

D’après le “lemme”, on peut améliorer notre définition de la substitution.

Définition 4.8. Pour $e \in \text{FUN}$, $x \in \mathcal{V}$ et v une valeur **close**, on définit la *substitution* $e[v/x]$ de x par v dans e par :

- ▷ $k[v/x] = k$;
- ▷ $y[v/x] = \begin{cases} v & \text{si } x = y \\ y & \text{si } x \neq y \end{cases}$;
- ▷ $(\text{fun } x \rightarrow e)[v/x] = (\text{fun } y \rightarrow e)[v/x]$ lorsque $x \neq y$;
- ▷ $(e_1 + e_2)[v/x] = (e_1[v/x]) + (e_2[v/x])$;
- ▷ $(e_1 e_2)[v/x] = (e_1[v/x]) (e_2[v/x])$.