

## Disclaimer

Le deux partie de ce document sont indépendantes et peuvent être lues dans n'importe quel ordre. L'objectif initial de partie 1 a été de discuter qu'est-ce que c'est une théorie mathématique en utilisant l'arithmétique comme exemple. Cependant, cette tentative s'est transformée vite dans un essai sur l'histoire de mathématique de la fin XIX<sup>ème</sup> siècle jusqu'au milieu du XX<sup>ème</sup>. On se concentre principalement sur les problèmes de consistance et notamment sur le deuxième problème de Hilbert. Il est évident que notre approche ne peut jamais être complète, donc on se restreint sur le contexte historique des avancées en formalisation d'arithmétique ainsi que la notion de calculabilité. Intentionnellement, on évite au maximum les définitions formelles et formules et invite le lecteur curieux de faire ses propres recherches en partant du Wikipédia (plutôt anglais) qui présente la plupart des définitions manquantes.

Au contraire, l'objectif de partie 2 est de donner au lecteur le goût de  $\lambda$ -calcul : on présente une définition plutôt complète, puis on montre, comment construire un langage de programmation élémentaire mais aussi puissant que la machine de Turing. Ce langage est connu comme le paradigme fonctionnel.

Finalement, l'ordre de lecture conseillée est plutôt le suivant : un passage "diagonale" de partie 2, puis lecture complète de partie 1 et la relecture de la partie 1 pendant laquelle on devra voir le sens derrière le forêt de détails techniques nécessaires pour introduire un système formel tel que  $\lambda$ -calcul.

## Part 1. Histoire de $\lambda$ -calcul

Qu'est-ce que c'est un  $\lambda$ -calcul ? Les codeurs sont familiers avec une notion de  $\lambda$ -fonction - une fonction anonyme qui est utilisée dans les morceaux de code qui ne méritent pas d'avoir un nom : clé de tri, les petites transformations dans les requêtes à la sql etc. Cependant, la notion de  $\lambda$ -fonction a été prise d'un système de calcul aussi puissant que la machine de Turing (est inventé dans les mêmes années 30s). Dans cet article on va discuter l'histoire de son invention pour mieux comprendre le concept.

### Plan

1. Crise des fondements
2. Axiomes de Peano

3. 1ere version de Lambda calculs
4. Theoreme de Goedel
5. Machine de Turing et calculabilité
6. Thèse de Church-Turing
7. Impact et applications

### Crise des fondements

Qui n'a jamais vu cette phrase : “*Cette phrase est fausse*” ? Probablement, personne. Tout le monde sait qu'elle n'est ni vrai ni fausse (effectivement, s'il on suppose qu'elle est vrai, alors elle doit être fausse et à l'invers). Conue depuis presque 3000 ans sous un nom d'un paradoxe du menteur, les mathématiciens ont eu une habitude de vivre avec jusqu'à la fin de XIXème siècle. Cépéndant, les “invités inattendus” ont arrivés de temps en temps :

- **Paradoxe du barbier.** Un barbier rase tous qui ne se rasent pas eux-mêmes et seulement ceux-ci; Qui rase ce barbier ?
- **Paradoxe sorite.** Un grain isolé ne constitue pas un tas. L'ajout d'un grain ne fait pas d'un non-tas, un tas. Donc on ne peut pas construire un tas par l'ajout des grains.
- **Paradoxe du crocodile.** Un crocodile méchant vous attrape et propose de deviner votre destin. Si votre devine est incorrecte, il vous mange. La réponse ? – “Tu vas me dévorer” !

Pour une liste exhaustive des paradoxes simples, on peut consulter un livre de Martin Gardner. “Aha! Gotcha. Paradoxes to puzzle and delight”. Maintenant, discutons un autre saboteur de logique : *Paradoxe de l'ensemble de Russel*. Disons qu'un ensemble est *simple* s'il n'appartient pas à lui-même. Par exemple, l'ensemble des tout les gens est simple, car cet ensemble n'est pas une personne. Ainsi, l'ensemble des tout les ensemble n'est pas simple par son définition. *L'ensemble de Russel* est un ensemble qui contient tout les ensembles simples et rien d'autre. Est-ce qu'un ensemble de Russel est simple ? Si c'est le cas, par construction il contient lui-même. Donc il n'est pas simple. Mais s'il n'est pas simple il doit contenir lui-même, ce que signifie qu'il est simple. *Contradiction*.

Les mathématiciens n'étude pas ni crocodiles, ni barbiers. Les questions des menteurs sont plutôt les compétences de code penal ou les philosophes.

Cependant dans une version de Russel ce paradoxe n'utilise que les constructions formelles de mathématique. Cela signifie que telles constructions sont contradictoires elles-mêmes : si nous avons prouvé qu'une formule propositionnelle est à la fois vraie et fausse, le même peut avoir lieu pour n'importe quel théorème. Si on ajoute qu'au début de XXème siècle paradoxe de Russel n'a pas été le seul paradoxe connu, on voit bien qu'est-ce que c'était le *crise de fondements* en mathématique.

Ce crise a été reflété sous le numéro 2 dans une liste des 23 fameux problèmes de Hilbert déterminants le développement du mathématique en XXème siècle.

**2ème problème de Hilbert** *Déterminer la consistance de l'arithmétique.*

Dans le sens plus formel, la consistance signifie le suivant.

1. Il y a des axiomes dont on peut déduire tout les théorèmes de l'arithmétique.
2. Aucun axiomes ne peut pas être déduit des autres.
3. Il n'existe pas d'une proposition X, tel que les axiome implique X ainsi que "non X".

L'étape 1 est plutôt constructif : en pratique, il est suffisant de produire les nombres (entiers, rationnels, réels) avec ses propriétés habituels. Dans l'étape 2 il faut prouver que les axiomes sont indépendants l'un des autres. Équivalentment, si on supprime n'importe quel axiome, l'étape 1 n'est plus vrai. L'étape 3 est le plus compliqué.

## Axiomes de Peano

L'arithmétique est un domaine de mathématique qui étudie les nombres et relations entre eux. Elle est appliquée partout de premières années de l'école jusqu'à les concepts modernes d'astrophysique. Cependant, pour construire les bases de l'arithmétique, il est presque suffisant de bien déterminer les nombres naturels ainsi que les action qu'on peut faire avec. (Les nombres entiers est une extension pour que opération  $x - y$  renvoie toujours un nombre valide, les nombres rationnels apparaissent si on étudie la division. Finalement, les nombres algébrique sont responsable pour résoudre les équations polynomiales et le reste - pour "fermer des trous"). Classiquement, les nombres naturels peuvent être définis de même façon qu'on fait quand les petits enfants apprennent à compter: ce résultat est connus depuis la fin de XIXème siècle comme les axiomes de Peano:

1. 1 est naturel;

2. le nombre suivant d'un nombre naturel est naturel;
3. rien ne suivi de 1;
4. si  $a$  suit  $b$  et  $a$  suit  $c$ , alors  $b = c$ ;
5. axiome de recurrence (i.e., si un prédicat  $A(x)$  est vrai pour  $x = 1$  ainsi que  $A(n)$  implique  $A(n + 1)$ , alors  $A(x)$  est vrai pour tout  $n$  naturel).

Montrons que avec ces axiomes sont suffisant pour construire tout les nombres.

- **Nombres naturels** sont déjà construit. Ok, pour être honête, nous avons construit les objets “bizzares” et les avons appelés les nombres naturels – prenez l’habitude que mathématique fondamental est une façon de parler des choses évidents depuis l’école avec des mots très sophistiqués. Mais la vrai avantage de cet approche est son **correctité** absolu.
- **Zero** est indispensable pour compter. Rien plus simple - ajoutons un objet nouveau spéciale, qui est (i) suivi de 1. Appelons lui “0”. Posons que pour tout  $n$  naturel (ii)  $n+0 = 0+n = n$  et aussi (iii)  $n \cdot 0 = 0 \cdot n = 0$  (servira pour le futur).
- On peut compter et même calculer la somme, mais les mathématiciens veulent plus de symmetrie, donc l’opération réciproque de “+” doit exister. D’accord: par définition, la différence  $a - b$  est un nombre  $c$  tel que  $a = b + c$ . Que vaut  $2 - 5$ ? Oups, il n’existe pas tel  $c$  que  $c + 5 = 2$  - n’oubliez pas qu’on veut la stricte absolue, donc on ne peut utiliser que des nombres déjà calculés. Nous n’avons pas de choix: disons que “ $2 - 5$ ” et un nouveau nombre. Ainsi que “ $1 - 2$ ”, “ $42 - 45$ ” et même “ $239 - 261$ ”. Cela semble beaucoup, mais remarquons que  $2 - 5$  est égal au  $42 - 45$  et aussi au  $0 - 3$ . Pour simplicité, omettons zero et écrivons juste -3. Félicitations ! Vous venez de construire les nombres **négatifs** et donc les nombres **entières** ! Cet opération s’appelle la **closure** et est très typique pour la génération des nouveaux objets.
- Les **nombres rationnels** arrivent par la même logique que : si nous pouvons calculer le produit, alors nous voulons diviser. Les résultats de tout les divisions possibles ( $1/2$ ,  $-2/3$ ,  $2/4$ ,  $37/17$ ,  $5/5$ , etc.) forment les nombres rationnels – vous devez le souvenir bien depuis l’école - d’habitude ils sont appris plus tard que les nombres négatifs.

- Imaginons l'axe de nombres. D'un point de vue, il est très dense – pour n'importe quel nombre rationnel, il existe un autre nombre rationnel qui est “autant proche de lui qu'on veut”. Il n'est pas suffisant ! Malheureusement,  $\sqrt{2}$  n'est pas rationnel (à propos : 7ème problème de Hilbert s'agit de prouver que  $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$  n'est pas rationnel). Donc les **nombres réels** sont définis par une autre closure. Informellement on remplit des “trous” sur l'axe des nombres. Pour les plus curieux qui souhaitent la construction formelle, la page de wikipedia est bien explicative. Personnellement, je préfère la construction par des coupes de Dedekind.

**todo: introduce the main manipulations for the lambda, combinators, SKI**

Heureusement, la vraie preuve d'une consistance des axiomes de Peano est un problème beaucoup plus sophistiqué que l'invention de ses axiomes, et l'histoire n'est donc que commencée.

## 1ère version de Lambda calcul

En 1932 Church a proposé une autre construction qui est connue comme  **$\lambda$ -calcul non-typé**. Malheureusement, son étudiant, Kleene a prouvé que cette construction n'a pas été consistante.

$\lambda$ -calcul a formalisé une application d'une fonction. L'écriture envisage la compréhension d'une fonction comme une “règle”. Et l'écriture classique  $f(x)$  pointe plutôt sur le résultat de ce règle.

Rappelons brièvement, qu'est ce que c'est. (Sinon, wiki et les autres articles ou “Eggs and crocodiles”) Le brique principal est une fonction. Au lieu de  $f(x)$  on écrit  $\lambda x.f$ . Si on parle de la valeur de  $f(x)$  quand  $x = a$ , on écrit  $\lambda x.f a$ . Naturellement, on peut définir une composition... Pour transformer des propositions on a une règle de  $\beta$ -reduction.

Malgré sa simplicité et abstraité, cette construction permet néanmoins rédefinir tout les opérations arithmétiques, la logique Booléen etc. Est-ce que  $\lambda$ -calcul non-typé est un bon candidat pour le rôle de fondement de mathématique ? La réponse est **non**: à cause de Paradoxe de Kleene-Rosser proposé en 1935 par J. B. Rosser et Stephen Kleene qui a été un étudiant de Church.

Ironiquement, ce paradoxe, beaucoup plus sophistiqué dans sa version initiale, n'a pas très loin des paradoxes plus simples décrites au début de cet article. Commençons par une phrase “si cette phrase est vraie, alors  $X$ ”, où  $X$  est un énoncé quelconq.

- Par les propriétés d'implications ("faux  $\Rightarrow$  X" est toujours vrai), cette phrase ne peut pas être fautive.
- S'il est vrai, alors X est vrai.
- Nous venons de prouver que n'importe quel énoncé est vrai, e.g. les États-Unis et la Chine ont une frontière commune (ce que peut probablement expliquer la construction de "The Great Wall").

Il peut être formulé en termes de  $\lambda$ -calculs. Mais la "rootcause" de tout le paradoxe de ce type est la même – l'autoréférence : la phrase entière est contenue dans sa première moitié. Remarquons qu'interdire les autoréférences dans la logique n'est pas la solution parfaite, car la logique devient trop restrictive par rapport au langage naturel.

Considérons une fonction  $r$  définie comme  $r = \lambda x.((xx) \rightarrow y)$ .  $(rr)$   $\beta$ -se réduit en  $(rr) \rightarrow y$ . Si  $(rr)$  est fautive, alors  $(rr) \rightarrow y$  est vrai par le principe d'explosion, mais cela est contradictoire avec la  $\beta$ -réduction. Donc  $(rr)$  est vrai. On en déduit que  $y$  est aussi vrai. Comme  $y$  peut être arbitraire, on a prouvé que n'importe quelle proposition est vraie. Contradiction.

## Théorème de Gödel

Les deux paradoxes discutés ci-dessus, sont basés sur le même concept de l'autoréférence : une proposition ou n'importe quel objet qui référence lui-même (e.g., ensemble des tous les ensembles). Faut-il interdire l'autoréférence dans les constructions mathématiques ? L'idée n'est pas séduisante si on rappelle que avec les paradoxes, nous avons jeté dans la poubelle tous les constructions récursives.

Néanmoins, l'autoréférence a une influence forte sur le fondement de mathématique. Un résultat clé et le plus connu comme le théorème de l'incomplétude a été prouvé par Kurt Gödel en 1930. Une des interprétations prétend que la consistance d'un système d'axiomes ne peut pas être prouvée en n'utilisant que ces axiomes (voici l'autoréférence !). En particulier, pour prouver la consistance d'arithmétique il faut ajouter les axiomes supplémentaires (qui a été vite fait, en 1936). Le seul problème est que maintenant il faut prouver un autre système...

Pour ceux qui veulent plonger dans le sujet de l'autoréférence, nous pouvons conseiller un livre "Gödel, Escher, Bach : Les Brins d'une Guirlande Éternelle" de Douglas Hofstadter.

La crise des fondements a déclenché plusieurs études sur le sujet. Nous avons brièvement présenté deux modèles qui ont été les candidats sur le rôle de base minimale de l'arithmétique. Cependant, le  $\lambda$ -calcul non typé est

contradictoire car il contient des paradoxes. La consistance de l'arithmétique Péano a été prouvée un an après, en utilisant la récurrence transfinie par Gerhard Gentzen. D'après le théorème de Gödel, l'ajout d'une proposition supplémentaire dans le système des axiomes a été nécessaire. C'était une idée qui a été manquante pendant presque 50 ans entre la publication des axiomes de Péano et la preuve de Gentzen.

Pour résumer le sujet de l'arithmétique, disons que dans la version moderne on construit le fondement toujours à partir des axiomes de Péano. Pour la consistance, au lieu de la récurrence transfinie, on rajoute la théorie des ensembles de Zermelo-Fraenkel avec l'axiome de choix. Néanmoins, chez les mathématiciens il n'y a pas de consensus si le deuxième problème de Hilbert est résolu ou non.

## **Machine de Turing et calculabilité**

Cependant, comme il est souvent en science, il faudrait étudier le même domaine de point de vue un peu différent. Cela a été fait sur l'autre continent par un jeune étudiant Alan Turing. Il a cherché une solution pour un problème de la décision posé en 1928 par Hilbert et Ackermann : "trouver un algorithme qui détermine dans un temps fini, s'il un énoncé est vrai ou faux". La formalisation d'un terme algorithme a conduit au concept de machine de Turing connu par tout le monde. Entre autres, le théorème de Gödel a été reformulé en termes d'une machine de Turing. Le résultat a été aussi négatif, connu comme un théorème de Turing-Church: "il existe des énoncés pour lesquels on ne peut pas déterminer" (vérifier l'énoncé et le nom d'un théorème).

## **Thèse de Church-Turing**

Le résultat positif. S'il existe des fonctions, qu'il ne peuvent pas être décidées, on se pose la question, qu'est-ce que ce sont les fonctions simples, i.e. les fonctions que l'on peut effectivement calculer. Intuitivement, c'est dont la valeur peut être calculée avec un crayon si on a suffisamment de papier et du temps. Mais vous comprenez déjà que les mathématiciens n'acceptent pas les solutions intuitives... Le problème de décision est lié avec un problème de calculabilité. Qu'est-ce que signifie qu'une fonction peut être calculée ? Souvent on se réfère sur "des méthodes d'un crayon et de papier". Indépendamment, chaque des deux a proposé que toute fonction calculable en termes de crayon et papier peut être calculée par son méthode (lambda-calcul ou la machine de Turing). Les deux propositions - ne sont pas des théorèmes, peuvent pas être prouvées car on ne peut pas formaliser autrement calculabilité. (On doit remarquer

ici qu'il y avait le troisième mécanisme de déterminer la calculabilité - les fonctions récursives primitives). Relativement vite il a été prouvé que tous les 3 mécanismes sont équivalents. Donc, n'importe lequel peut être utilisé comme une définition de fonction effectivement calculable.

## Résumé. Impacts de $\lambda$ -calcul

Le concept de  $\lambda$ -calcul a joué un rôle tellement important dans l'informatique théorique que l'on peut voir ses échos en pratique : dans la plupart des langages de programmation une notion de  $\lambda$ -fonction représente une fonction "anonyme". Cette notion rend le terme connu par des ingénieurs mais la plupart ne connaît pas les détails cachés derrière. Cela provoque souvent les discussions dans StackOverflow similaires à celui-ci : *"Another obvious case for combinators is obfuscation. A code translated into the SKI calculus is practically unreadable. If you really have to obfuscate an implementation of an algorithm, consider using combinators, here is an example."*

En réalité le concept a eu quatre impacts principaux.

1. *Formalisation d'une notion de calculabilité.* Avant les années 1930s, la définition de calculabilité pouvait être caricaturisée comme "calculable à l'aide du papier, crayon et suffisamment du temps". En plus il y avait une intuition que les fonctions récursives doivent définir la classe des fonctions calculables. L'invention de  $\lambda$ -calcul et machine de Turing a relancé une discussion sur la notion de calculabilité. Comme tous les trois concepts ont été prouvés équivalents, les mathématiciens se sont mis d'accord à les utiliser comme une définition formelle de calculabilité.
2. *Preuves de calculabilité.* Car les trois concepts sont équivalents, n'importe lequel peut être utilisé pour prouver la calculabilité d'un nouveau objet. Donc on peut considérer  $\lambda$ -calcul comme un outil de plus (en réalité utilisé plus souvent pour prouver qu'un objet n'est pas calculable).
3. *Preuves formelles.* La version des  $\lambda$ -calcul typés peut être appliquée dans la théorie des preuves. Ainsi, les certains langages de preuves formelles tels que Coq ou AUTOMATH sont basés sur ce modèle.
4.  $\lambda$ -calcul est un *langage de programmation* primitif (en nombre de constructions). Comme la machine de Turing est le fondement de tous les langages impératifs,  $\lambda$ -calcul est une base pour les langages fonctionnels tels que Haskell ou OCaml.



## Part 2. Les formalités.

### Introduction informelle dans la programmation fonctionnelle

#### What is $\lambda$ ?

<sup>1</sup> En mathématique la notion d'une fonction est liée avec une application, i.e., règle qui transform paramètre dans un résultat. Au contraire,  $\lambda$ -calcul est une théorie des "fonctions comme formules". La différence est ce que une formule formelle n'est pas obligatoirement se traduit en règle bien précise. Commençons par un exemple. En arithmétique on peut écrire :

Soit  $f$  est une fonction  $x \rightarrow x^2$ . Considerons  $A = f(5)$ .

En langage de lambda, on peut écrire simplement:

$$(\lambda x.x^2)(5).$$

L'expression  $\lambda x.x^2$  signifie une fonction qui mappe  $x$  à  $x^2$ . Puis ce terme est succédé par une *application* de cette fonction au nombre 5. L'un des avantage de cette notation est simplicité dans la construction des fonctions de l'ordre supérieur : si  $f : X \rightarrow X$  est une fonction, alors la composition  $f \circ f$  peut s'écrire comme  $\lambda x.f(f(x))$ . Ceci n'est pas simple, mais l'opération qui mappe  $f$  à  $f \circ f$  s'écrit mécaniquement de manière suivante :

$$\lambda f.\lambda x.f(f(x)).$$

(On peut le comparer avec  $g : (X \rightarrow X) \rightarrow (X \rightarrow X)$  où  $g(f) = f \circ f$  pour tout  $f : X \rightarrow X$ .) Le vrai avantage est visible si on considère un terme  $f$  suivant:  $\lambda x.x$ . Rien inattendu, c'est une fonction d'identité. Mais que vaut  $f(f)$ ? Par définition, si on pose  $x = f$ ,

$$f(f) = (\lambda x.x)(f) = f.$$

Remarquons que  $f(f)$  n'a jamais du sens dans mathématique classique car la fonction ne peut pas être incluse dans sa propre domaine de définition.

**todo:  $\lambda$  sans type est simplement typé**

#### Combinateurs

Le cas spécial de  $\lambda$ -termes sans type sont les termes qui n'ont pas des variables libres. Ils s'appellent *combinateurs*. Voici les exemples des combinateurs classiques :

---

<sup>1</sup>based on Selinger's lecture notes

- $I = \lambda x.x$
- $\omega = \lambda x.xx$
- $\Omega = \omega\omega = (\lambda x.xx)\lambda x.xx$
- $K = \lambda xy.x$
- $K_* = \lambda xy.y$
- $C = \lambda fxy.fyx$
- $B = \lambda fgx.f(gx)$
- $S = \lambda fgx.fx(gx)$

Chaque combinateur peut être appliqué aux autres termes, par exemple :

- $I\chi = \chi$
- $\omega\chi = \chi\chi$
- $K\chi y = \chi$
- $Sfg\chi = f\chi(g\chi)$

Les formules ci-dessus peuvent s'en servir tant que la définition des combinateurs. Le calcul est effectué en remplaçant les arguments formels par ses valeurs, e.g.,

$$\omega I = II = I$$

. Notons, que les certains combinateurs peuvent être exprimé en termes des autres. (**todo**) Si on choisit une base, e.g.,  $S$ ,  $K$  (et  $I$  tant que un élément neutre), on peut obtenir un système de calcul qui est équivalent au  $\lambda$ -calcul.

## Prise en main<sup>2</sup>

Dans *lambda*-calcul sans type nous n'avons qu'un seul primitif - des fonctions. Dons, si on veut l'utiliser pour la programmation, c'est à nous de réaliser même les objets les plus élémentaires, tels que les nombres ou les constantes booléennes.

$tru \quad := \lambda t.\lambda f.t$  est une fonction qui renvoie son premier argument,  
 $fls \quad := \lambda t.\lambda f.t$  est une fonction qui renvoie son deuxième argument.

---

<sup>2</sup>Basé sur l'article russe <https://habr.com/ru/post/215991/>

Les termes *tru* et *fls* vont jouer le rôle de **vrai** et **faux**. Cependant, pour l'instant ils ne sont que des formules formelles qui manquent du contexte. Comme ce contexte, définissons la fonction *if*

$$if := \lambda b. \lambda x. \lambda y. bxy$$

Ici, *b* est une condition de branchement, *x* et branche **then** et *y* correspondents à **else**. Donc, pour “montrer” que *tru* et *fls* correspondent aux constantes logiques, nous avons besoin de prouver le suivant:

$$\begin{aligned} if\ tru\ t\ e &= t, \\ if\ fls\ t\ e &= e \end{aligned}$$

Pour les formules formelles “prouver” signifie “partir d’une expression à gauche, appliquer les certaines règles afin d’obtenir une expression à droite”. Donc c’est le moment de parler de ces règles. Pour  $\lambda$ -calcul il y en a deux :

1.  **$\alpha$ -equivalence**. Informellement<sup>3</sup>, on dit que deux termes sont équivalents s’il coïncident à renommage des variables abstraites près. Par exemple,  $\lambda x. f(x) \equiv_{\alpha} \lambda y. f(y)$ . Par une variable abstraite on comprend une variable qui est présente à gauche et à droite du point, e.g., *x* et *y* eux-mêmes ne sont pas  $\lambda$ -équivalents car il ne sont pas abstraites.
2.  **$\beta$ -reduction**.

Notons que dans  $\lambda$ -calcul, il n’y a rien sauf application, abstraction et  $\beta$ -équivalence.

*Preuve* (*if fls t e = e*).

$$\begin{aligned} if\ fls\ t\ e &= (\lambda b. \lambda x. \lambda y. b\ x\ y)\ fls\ t\ e && \text{par définition de } if \\ &= (\lambda x. \lambda y. fls\ x\ y)\ t\ e && \text{par } \beta\text{-reduction de } \lambda b \\ &= (\lambda y. fls\ t\ y)\ e && \text{par } \beta\text{-reduction de } \lambda x \\ &= fls\ t\ e && \text{par } \beta\text{-reduction de } \lambda y \\ &= (\lambda t. \lambda f. f)\ t\ e && \text{par définition de } fls \\ &= (\lambda f. f)\ e && \text{par } \beta\text{-reduction de } \lambda t \\ &= e && \text{par } \beta\text{-reduction de } \lambda f \end{aligned}$$

□

---

<sup>3</sup>la définition formelle peut être trouvée dans n’importe quel livre, mais sa complexité dépasse largement les objectifs du blog.

Un lecteur curieux peut vérifier par lui-même que  $if\ true\ t\ e = e$ . De plus, un vrai passionné peut essayer de trouver les bonnes expressions pour conjonctions (“and”), disjonction (“or”) ainsi que negation (“not”).

**spoiler.**

- $and = \lambda x. \lambda y. x\ y\ fls$
- $or = \lambda x. \lambda y. x\ true\ y$
- $not = \lambda x. x\ fls\ true$

## Pourquoi langage de programmation?

Recursion à l’aide de combinators