

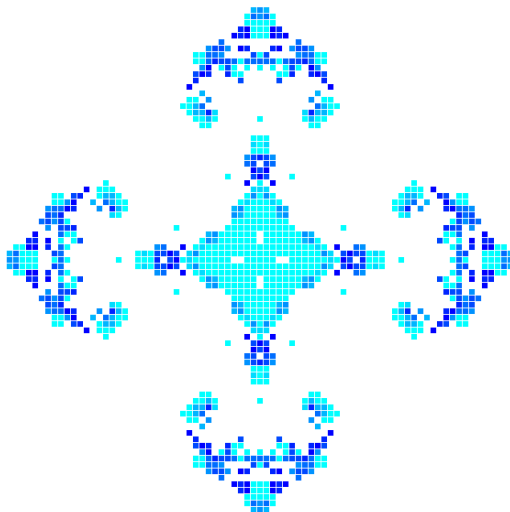
# Monades, Comonades et Automates cellulaires

Jérémy S. Cochoy

INRIA Paris-Saclay

Octobre 2015

- 1 Monades
  - Types
  - Fonctions
  - Foncteurs
  - Monades
- 2 Automates Cellulaires
- 3 Comonades
- 4 Évaluer un automate est comonadique
  - Un univers
  - Un foncteur
  - Une comonade
  - Evaluation



# Les types

Qu'est-ce qu'un type ?

C'est un *ensemble* de valeurs.

Exemples :

- $Int = \{-2147483648, \dots, 2147483647\}$
- $Bool = \{True, False\}$
- $Char = \{'a', 'b', 'c', \dots\}$
- $[Bool] = \{[], [True], [False], [True, False], [False, True], \dots\}$
- $[a]$

# Les types

Qu'est-ce qu'un type ?

C'est un *ensemble* de valeurs.

Exemples :

- $Int = \{-2147483648, \dots, 2147483647\}$
- $Bool = \{True, False\}$
- $Char = \{'a', 'b', 'c', \dots\}$
- $[Bool] = \{[], [True], [False], [True, False], [False, True], \dots\}$
- $[a]$

# Les types

Qu'est-ce qu'un type ?

C'est un *ensemble* de valeurs.

Exemples :

- $Int = \{-2147483648, \dots, 2147483647\}$
- $Bool = \{True, False\}$
- $Char = \{'a', 'b', 'c', \dots\}$
- $[Bool] = \{[], [True], [False], [True, False], [False, True], \dots\}$
- $[a]$

# Les types

Qu'est-ce qu'un type ?

C'est un *ensemble* de valeurs.

Exemples :

- $Int = \{-2147483648, \dots, 2147483647\}$
- $Bool = \{True, False\}$
- $Char = \{'a', 'b', 'c', \dots\}$
- $[Bool] = \{[], [True], [False], [True, False], [False, True], \dots\}$
- $[a]$

# Les types

## Construire son type :

- $\text{Trival} = \text{Plus} \mid \text{Minus} \mid \text{Zero}$
- $\text{Box } a = \text{InABox } a$
- $\text{Maybe } a = \text{Just } a \mid \text{Nothing}$
- $\text{Either } a \ b = \text{Left } a \mid \text{Right } b$

Just, Nothing, InABox etc portent le doux nom de *constructeur de type*.  
C'est aussi le cas de `[]`.



# Les types

## Construire son type :

- $\text{Trival} = \text{Plus} \mid \text{Minus} \mid \text{Zero}$
- $\text{Box } a = \text{InABox } a$
- $\text{Maybe } a = \text{Just } a \mid \text{Nothing}$
- $\text{Either } a \ b = \text{Left } a \mid \text{Right } b$

Just, Nothing, InABox etc portent le doux nom de *constructeur de type*.  
C'est aussi le cas de `[]`.

# Les types

## Construire son type :

- $\text{Trival} = \text{Plus} \mid \text{Minus} \mid \text{Zero}$
- $\text{Box } a = \text{InABox } a$
- $\text{Maybe } a = \text{Just } a \mid \text{Nothing}$
- $\text{Either } a \ b = \text{Left } a \mid \text{Right } b$

Just, Nothing, InABox etc portent le doux nom de *constructeur de type*.  
C'est aussi le cas de `[]`.

# Les types

## Construire son type :

- $\text{Trival} = \text{Plus} \mid \text{Minus} \mid \text{Zero}$
- $\text{Box } a = \text{InABox } a$
- $\text{Maybe } a = \text{Just } a \mid \text{Nothing}$
- $\text{Either } a \ b = \text{Left } a \mid \text{Right } b$

Just, Nothing, InABox etc portent le doux nom de *constructeur de type*.  
C'est aussi le cas de `[]`.

# Les types

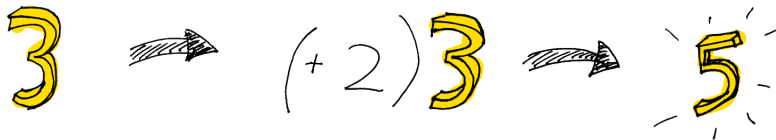
## Construire son type :

- $\text{Trival} = \text{Plus} \mid \text{Minus} \mid \text{Zero}$
- $\text{Box } a = \text{InABox } a$
- $\text{Maybe } a = \text{Just } a \mid \text{Nothing}$
- $\text{Either } a \ b = \text{Left } a \mid \text{Right } b$

Just, Nothing, InABox etc portent le doux nom de *constructeur de type*. C'est aussi le cas de `[]`.

# Les fonctions

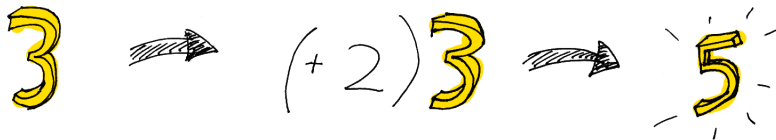
Ce sont les traitements que l'on peut implémenter.



Une fonction ne lance pas de fusé.

# Les fonctions

Ce sont les traitements que l'on peut implémenter.



Une fonction ne lance pas de fusé.

# Les fonctions

Une fonction a aussi un type :  $a \rightarrow b$

- $\text{floor} :: \text{Float} \rightarrow \text{Int}$
- $(+2) :: \text{Int} \rightarrow \text{Int}$
- $\text{id} :: a \rightarrow a$
- $\text{map} :: (a \rightarrow b) \rightarrow [a] \rightarrow [b]$

# Les fonctions

Une fonction a aussi un type :  $a \rightarrow b$

- $\text{floor} :: \text{Float} \rightarrow \text{Int}$
- $(+2) :: \text{Int} \rightarrow \text{Int}$
- $\text{id} :: a \rightarrow a$
- $\text{map} :: (a \rightarrow b) \rightarrow [a] \rightarrow [b]$



# Les fonctions

Ça se compose

- $f1 :: a \rightarrow b$
- $f2 :: b \rightarrow c$
- $f2 . f1 :: a \rightarrow c$
- $::: (a \rightarrow b) \rightarrow (b \rightarrow c) \rightarrow (a \rightarrow c)$

La collection de tous les types forme une catégorie. Les flèches sont les fonctions implémentables. On l'appelle la catégorie des types.

# Les fonctions

Ça se compose

- $f1 :: a \rightarrow b$
- $f2 :: b \rightarrow c$
- $f2 . f1 :: a \rightarrow c$
- $. :: (a \rightarrow b) \rightarrow (b \rightarrow c) \rightarrow (a \rightarrow c)$

La collection de tous les types forme une catégorie. Les flèches sont les fonctions implémentables. On l'appelle la catégorie des types.

# Les fonctions

Ça se compose

- $f1 :: a \rightarrow b$
- $f2 :: b \rightarrow c$
- $f2 . f1 :: a \rightarrow c$
- $. :: (a \rightarrow b) \rightarrow (b \rightarrow c) \rightarrow (a \rightarrow c)$

La collection de tous les types forme une catégorie. Les flèches sont les fonctions implémentables. On l'appelle la catégorie des types.

# Les foncteurs

Un foncteur  $F$  agit sur les types ...

- $a \Rightarrow F\ a$

- $a \Rightarrow \text{Maybe } a$

- $a \Rightarrow [a]$

... et sur les fonctions

- $a \rightarrow b \Rightarrow F\ a \rightarrow F\ b$

- $\text{fmap } (+2) :: F\ \text{Int} \rightarrow F\ \text{Int}$

- $\text{fmap id} :: F\ a \rightarrow F\ a$

# Les foncteurs

## Un foncteur $F$ agit sur les types ...

- $a \Rightarrow F\ a$

- $a \Rightarrow \text{Maybe } a$

- $a \Rightarrow [a]$

## ... et sur les fonctions

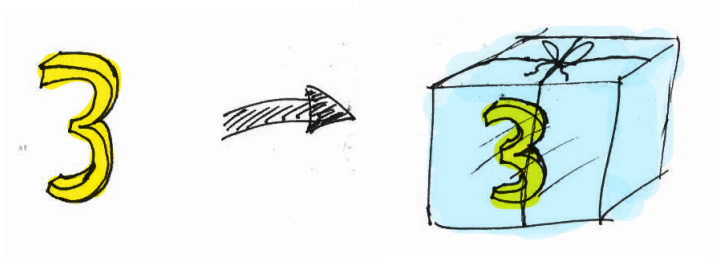
- $a \rightarrow b \Rightarrow F\ a \rightarrow F\ b$

- $\text{fmap } (+2) :: F\ \text{Int} \rightarrow F\ \text{Int}$

- $\text{fmap id} :: F\ a \rightarrow F\ a$

# Donnée dans un contexte

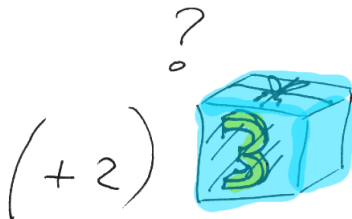
Un foncteur permet de passer d'un monde (les types  $a$ ) vers un autre (les types  $F\ a$ ).



TODO : Remplacer l'image par  $a \rightarrow F\ a$

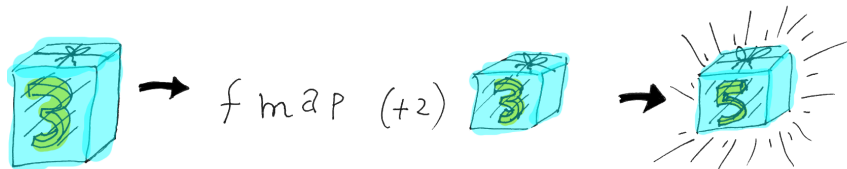
# Functorial mapping

On ne peut plus appliquer la fonction telle quelle les diagrammes suivant commutent :



# Functorial mapping

Mais le foncteur nous donne une nouvelle flèche.





# Dura lex sed lex

## Un foncteur doit respecter des lois

- $\text{fmap id} = \text{id}$
- $\text{fmap } (p \cdot q) = (\text{fmap } p) \cdot (\text{fmap } q)$

Un foncteur est un endofoncteur de la catégorie des types.

# Dura lex sed lex

## Un foncteur doit respecter des lois

- $\text{fmap id} = \text{id}$
- $\text{fmap } (p . q) = (\text{fmap } p) . (\text{fmap } q)$

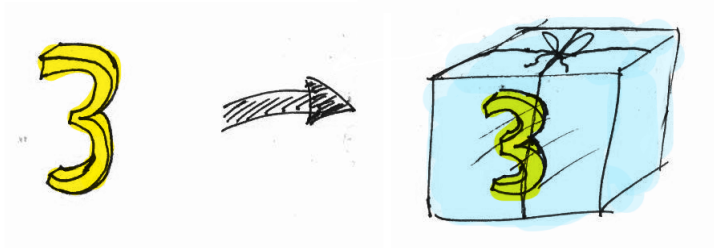
Un foncteur est un endofoncteur de la catégorie des types.

# Monades

TODO : Funny picture here.

# Donnée dans un contexte

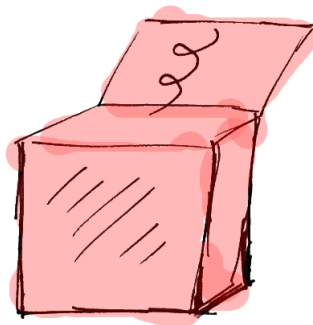
Une monade place une valeur dans un contexte.



L'exemple de Maybe : Just 3

# Donnée dans un contexte

Un contexte peut aussi ne pas contenir de valeur.



L'exemple de Maybe : Nothing

# Placer une donnée dans un contexte

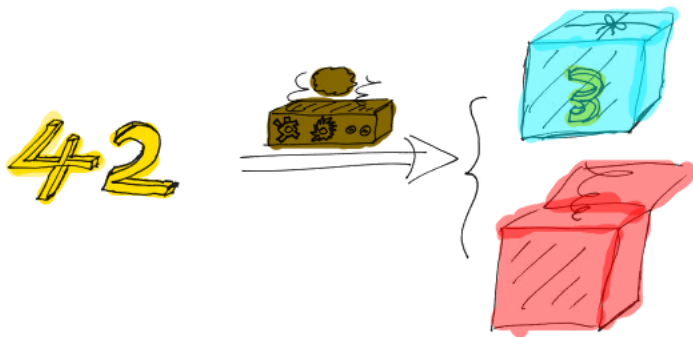
## L'opérateur *pure*

$$\text{pure} :: a \rightarrow F a$$

## Quelques cas particuliers

- Just
- ( : [] )
- Right

# Un traitement qui peut échouer



Une fonction de type  $Int \rightarrow Maybe\ Int$ .

# Composer des traitements avec échec

Comment composer  $f :: a \rightarrow M\ b$  et  $g :: b \rightarrow M\ c$  ?

Si  $M$  est un foncteur, on peut composer  $f :: a \rightarrow M\ b$  avec  $\text{fmap } g :: M\ b \rightarrow M\ (M\ c)$ .

Que faire d'un  $M\ (M\ c)$  ?



# Composer des traitements avec échec

Comment composer  $f :: a \rightarrow M\ b$  et  $g :: b \rightarrow M\ c$  ?

Si  $M$  est un foncteur, on peut composer  $f :: a \rightarrow M\ b$  avec  $\text{fmap } g :: M\ b \rightarrow M\ (M\ c)$ .

Que faire d'un  $M\ (M\ c)$  ?

# Composer des traitements avec échec

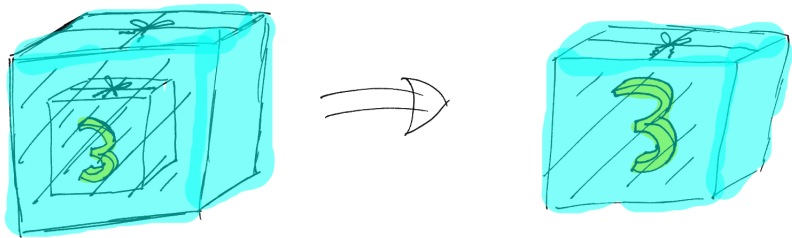
Comment composer  $f :: a \rightarrow M\ b$  et  $g :: b \rightarrow M\ c$  ?

Si  $M$  est un foncteur, on peut composer  $f :: a \rightarrow M\ b$  avec  $\text{fmap } g :: M\ b \rightarrow M\ (M\ c)$ .

Que faire d'un  $M\ (M\ c)$  ?

# L'opérateur join

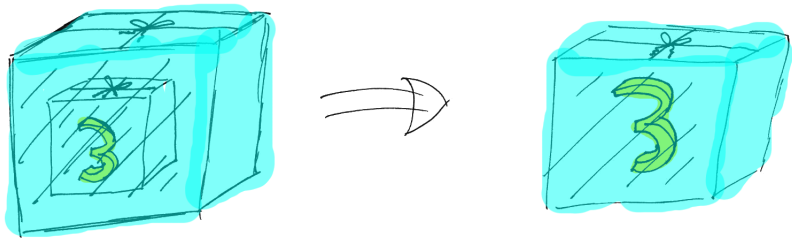
$\text{join} :: M (M a) \rightarrow M a$



`join $ Just (Just 3).`

# L'opérateur join

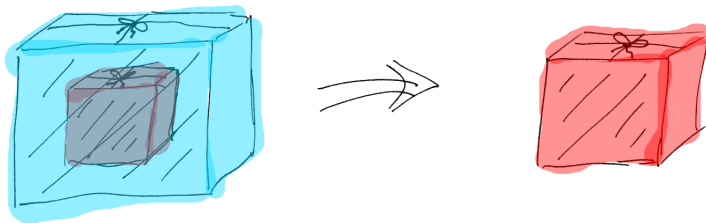
`join :: M (M a) -> M a`



`join $ Just (Just 3).`

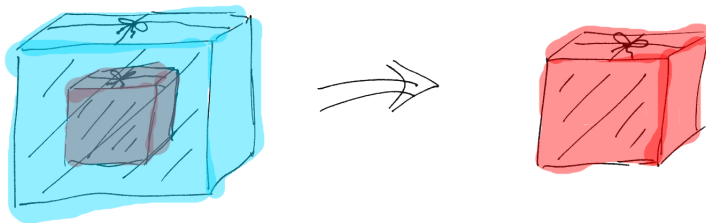
# L'opérateur join

`join :: M (M a) -> M a`



`join $ Just (Nothing).`

# L'opérateur join

$$\text{join} :: M (M a) \rightarrow M a$$

$$\text{join } \$ \text{ Just (Nothing)}.$$

# L'opérateur *bind*

On cherche à définir la composition.

$$(=>) :: (a \rightarrow M\ b) \rightarrow (b \rightarrow M\ c) \rightarrow (a \rightarrow M\ c)$$

Nous avons :

- $(\text{fmap } g) . f :: a \rightarrow M\ (M\ c)$
- $\text{join} :: M\ (M\ a) \rightarrow M\ a$

On peut maintenant composer  $f$  et  $g$ .

$$f \Rightarrow g \equiv \text{join} . (\text{fmap } g) . f.$$

# L'opérateur *bind*

On cherche à définir la composition.

$$(=>) :: (a \rightarrow M\ b) \rightarrow (b \rightarrow M\ c) \rightarrow (a \rightarrow M\ c)$$

Nous avons :

- $(\text{fmap } g) . f :: a \rightarrow M\ (M\ c)$
- $\text{join} :: M\ (M\ a) \rightarrow M\ a$

On peut maintenant composer  $f$  et  $g$ .

$$f \Rightarrow g \equiv \text{join} . (\text{fmap } g) . f.$$



# L'opérateur *bind*

On cherche à définir la composition.

$$(=>) :: (a \rightarrow M\ b) \rightarrow (b \rightarrow M\ c) \rightarrow (a \rightarrow M\ c)$$

Nous avons :

- $(\text{fmap } g) . f :: a \rightarrow M\ (M\ c)$
- $\text{join} :: M\ (M\ a) \rightarrow M\ a$

On peut maintenant composer  $f$  et  $g$ .

$$f \Rightarrow g \equiv \text{join} . (\text{fmap } g) . f.$$

# Récapitulatif

## Une monade, c'est

- $\text{fmap} :: (a \rightarrow b) \rightarrow (M\ a \rightarrow M\ b)$
- $\text{pure} :: a \rightarrow M\ a$
- $\text{join} :: M\ (M\ a) \rightarrow M\ a$

# Dura lex sed lex

## Une monade doit respecter des lois

- $\text{pure} \cdot f \equiv (\text{fmap } f) \cdot \text{pure}$
- $\text{join} \cdot \text{fmap } (\text{fmap } f) \equiv (\text{fmap } f) \cdot \text{join}$
- $\text{join} \cdot \text{fmap } \text{join} \equiv \text{join} \cdot \text{join}$
- $\text{join} \cdot \text{fmap } \text{pure} \equiv \text{join} \cdot \text{pure} = \text{id}$

# Monades - Catégories

Une monade  $(T, \mu, \eta)$  est la donnée d'un endofoncteur  $T : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}$  et de deux transformations naturelles  $\mu : T \circ T \rightarrow T$  et  $\eta : 1_{\mathcal{C}} \rightarrow T$  telles que :

$$\begin{array}{ccc}
 T(T(T(X))) & \xrightarrow{T(\mu_X)} & T(T(X)) \\
 \mu_{T(X)} \downarrow & & \downarrow \mu_X \\
 T(T(X)) & \xrightarrow{\mu_X} & T(X)
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 T(X) & \xrightarrow{\eta_{T(X)}} & T(T(X)) \\
 T(\eta_X) \downarrow & \searrow & \downarrow \mu_X \\
 T(T(X)) & \xrightarrow{\mu_X} & T(X)
 \end{array}$$

c'est à dire  $\mu \circ T\mu = \mu \circ \mu_T$  et  $\mu \circ T\eta = \mu \circ \eta_T = id_T$ .

Dans notre cas,  $\mathcal{C}$  est la catégorie des types.

# Monades - Catégories

Une monade  $(T, \mu, \eta)$  est la donnée d'un endofoncteur  $T : C \rightarrow C$  et de deux transformations naturelles  $\mu : T \circ T \rightarrow T$  et  $\eta : 1_C \rightarrow T$  telles que :

$$\begin{array}{ccc}
 T(T(T(X))) & \xrightarrow{T(\mu_X)} & T(T(X)) \\
 \mu_{T(X)} \downarrow & & \downarrow \mu_X \\
 T(T(X)) & \xrightarrow{\mu_X} & T(X)
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 T(X) & \xrightarrow{\eta_{T(X)}} & T(T(X)) \\
 T(\eta_X) \downarrow & \searrow & \downarrow \mu_X \\
 T(T(X)) & \xrightarrow{\mu_X} & T(X)
 \end{array}$$

c'est à dire  $\mu \circ T\mu = \mu \circ \mu_T$  et  $\mu \circ T\eta = \mu \circ \eta_T = id_T$ .

Dans notre cas,  $C$  est la catégorie des types.

# A chaque loi son diagramme

pure est une T.N.

`pure . f ≡ (fmap f) . pure`

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{f} & Y \\ \eta_X \downarrow & & \downarrow \eta_Y \\ T(X) & \xrightarrow{T(f)} & T(Y) \end{array}$$

# A chaque loi son diagramme

join est une T.N.

`join . fmap (fmap f) ≡ (fmap f) . join`

$$\begin{array}{ccc} T(T(X)) & \xrightarrow{T(T(f))} & T(T(Y)) \\ \mu_X \downarrow & & \downarrow \mu_Y \\ T(X) & \xrightarrow{T(f)} & T(Y) \end{array}$$

# A chaque loi son diagramme

## Associativité

`join . fmap join ≡ join . join`

$$\begin{array}{ccc} T(T(T(X))) & \xrightarrow{T(\mu_X)} & T(T(X)) \\ \mu_{T(X)} \downarrow & & \downarrow \mu_X \\ T(T(X)) & \xrightarrow{\mu_X} & T(X) \end{array}$$

$$\mu \circ T\mu = \mu \circ \mu_T$$



# A chaque loi son diagramme

## Existence d'un neutre

`join . fmap pure  $\equiv$  join . pure = id`

$$\begin{array}{ccc} T(X) & \xrightarrow{\eta_{T(X)}} & T(T(X)) \\ T(\eta_X) \downarrow & \searrow & \downarrow \mu_X \\ T(T(X)) & \xrightarrow{\mu_X} & T(X) \end{array}$$

$$\mu \circ T\eta = \mu \circ \eta_T = id_T$$

## Automates cellulaires

TODO : COMMIT TEXTILE CONE

Toison d'or

# Qu'est-ce qu'un automate cellulaire ?

Un automate cellulaire, c'est :

- Un nombre fini d'états  $S$ ,
- Une grille de cellules,
- La notion de voisinage d'une cellule  $V_C$ ,
- D'une fonction de transition qui à une cellule associe son nouvel état.

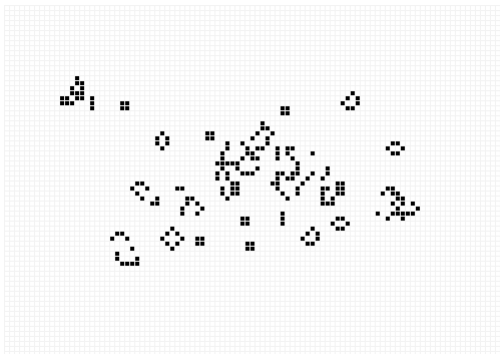
# Combien d'automates cellulaires différents ?

On a le choix :

- De la dimension de la grille,
- Des lois,
- Du nombres d'états (couleurs),
- De la forme du voisinages (boules de rayon  $r$ , etc.),
- De ne pas être déterministe.

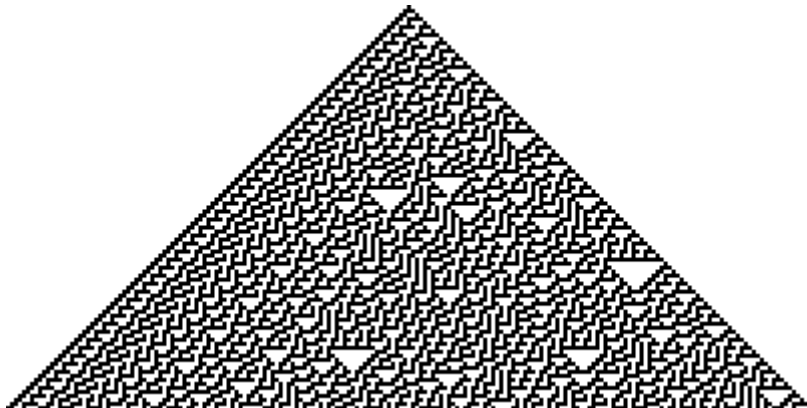
# The "Game of Life"

## Jeu de la vie (J. H. Conway)



# Étude d'un cas : Rule 30

Rule 30



# La grille

## La grille de l'automate



- Une grille 1D
- Deux états (Blanc / Noir)

Un voisinage de 3 cellules.

Les règles



On peut aussi écrire :

Ancien état	111	110	101	100	011	010	001	000
Nouvel état	0	0	0	1	1	1	1	0



Un voisinage de 3 cellules.

## Les règles



On peut aussi écrire :

Ancien état	111	110	101	100	011	010	001	000
Nouvel état	0	0	0	1	1	1	1	0

Un voisinage de 3 cellules.

Les règles



On peut aussi écrire :

Ancien état	111	110	101	100	011	010	001	000
Nouvel état	0	0	0	1	1	1	1	0

Comonades

TODO : Funny comonad picture

# C'est le dual d'une monade

- extract (copure) (co unit) : :  $M\ a \rightarrow a$
- duplicate (cojoin) (co product  $\delta$ ) : :  $M\ a \rightarrow M\ (M\ a)$

# Dura lex sed lex

## Une comonade doit respecter des lois

- $(\text{fmap } (\text{fmap } f)) \cdot \text{duplicate} \equiv \text{duplicate} \cdot \text{fmap } f$
- $\text{duplicate} \cdot \text{duplicate} = \text{fmap duplicate} \cdot \text{duplicate}$
- $\text{duplicate} \cdot \text{duplicate} \equiv \text{fmap duplicate} \cdot \text{duplicate}$   
(commut)
- $\text{fmap extract} \cdot \text{duplicate} \equiv \text{extract} \cdot \text{duplicate} \equiv \text{id}(\text{co unit})$

## Comonades - Catégories

Une comonade  $(T, \delta, \epsilon)$  est la donnée d'un endofoncteur  $T : C \rightarrow C$  et de deux transformations naturelles  $\Delta : T \rightarrow T \circ T$  et  $\epsilon : T \rightarrow 1_C$  telles que :

$$\begin{array}{ccc}
 T(X) & \xrightarrow{\Delta_X} & T(T(X)) \\
 \Delta_X \downarrow & & \downarrow \Delta_{T(X)} \\
 T(T(X)) & \xrightarrow{T(\Delta_X)} & T(T(T(X)))
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 T(X) & \xrightarrow{\Delta_X} & T(T(X)) \\
 \Delta_X \downarrow & \searrow & \downarrow \epsilon_{T(X)} \\
 T(T(X)) & \xrightarrow{T(\epsilon_X)} & T(X)
 \end{array}$$

c'est à dire  $\Delta_T \circ \Delta = T\Delta \circ \Delta$  et  $T\epsilon \circ \Delta = \epsilon_T \circ \Delta = id$ .

# A chaque loi son diagramme

`extract` est une T.N.

`f . extract`  $\equiv$  `extract . (fmap f)`

$$\begin{array}{ccc}
 X & \xrightarrow{f} & Y \\
 \uparrow \epsilon_X & & \uparrow \epsilon_Y \\
 T(X) & \xrightarrow{T(f)} & T(Y)
 \end{array}$$

# A chaque loi son diagramme

`duplicate` est une T.N.

`(fmap (fmap f)) . duplicate ≡ duplicate . fmap f`

$$\begin{array}{ccc}
 T(X) & \xrightarrow{T(f)} & T(Y) \\
 \Delta_X \downarrow & & \downarrow \Delta_Y \\
 T(T(X)) & \xrightarrow{T(T(f))} & T(T(Y))
 \end{array}$$



# A chaque loi son diagramme

## Coassociativité

`duplicate . duplicate = fmap duplicate . duplicate`

$$\begin{array}{ccc}
 T(X) & \xrightarrow{\Delta_X} & T(T(X)) \\
 \Delta_X \downarrow & & \downarrow \Delta_{T(X)} \\
 T(T(X)) & \xrightarrow{T(\Delta_X)} & T(T(T(X)))
 \end{array}$$

$$\Delta_T \circ \Delta = T\Delta \circ \Delta$$

# A chaque loi son diagramme

## Existence d'une counité

`extract . duplicate = fmap extract . duplicate = id`

$$\begin{array}{ccc}
 T(X) & \xrightarrow{\Delta_X} & T(T(X)) \\
 \Delta_X \downarrow & \searrow & \downarrow \epsilon_{T(X)} \\
 T(T(X)) & \xrightarrow{T(\epsilon_X)} & T(X)
 \end{array}$$

$$\epsilon_T \circ \Delta = T\epsilon \circ \Delta = id_T$$

TODO : Une image pour la section evaluation comonadic des automates.  
automata\_flip.png?

# L'univers

TODO :DESSIN RUBAN

## Un ruban

On représente l'univers dans lequel vit notre automate par un ruban, que l'on voit comme trois parties :

- La partie infinie à gauche
- La case observée
- La partie infinie à droite

```
data Universe a = Universe [a] a [a]
```

# Quelques opérations sur notre univers

TODO : Image Regarder à gauche

## Voyageons

On s'autorise à effectuer quelques opérations raisonnables sur notre univers :

- Regarder à gauche (left shift)
- Regarder à droite (right shift)

Moralement, on *translate* notre ruban.

left, right : : Universe  $a \rightarrow$  Universe  $a$

# Quelques opérations sur notre univers

TODO : Image Regarder à gauche

## Voyageons

On s'autorise à effectuer quelques opérations raisonnables sur notre univers :

- Regarder à gauche (left shift)
- Regarder à droite (right shift)

Moralement, on *translate* notre ruban.

left, right : : Universe  $a \rightarrow$  Universe  $a$

# Quelques opérations sur notre univers

TODO : Image Regarder à gauche

## Voyageons

On s'autorise à effectuer quelques opérations raisonnables sur notre univers :

- Regarder à gauche (left shift)
- Regarder à droite (right shift)

Moralement, on *translate* notre ruban.

left, right : : Universe  $a \rightarrow$  Universe  $a$

# Univers est fonctoriel

## Un foncteur

Notre ruban est naturellement un foncteur : Il suffit d'appliquer à notre *universe*  $a$  une fonction  $a \rightarrow b$  sur chacune des cellules pour obtenir un *Universe*  $b$ .

$\text{fmap} :: (a \rightarrow b) \rightarrow \text{Universe } a \rightarrow \text{Universe } b$



# Comonades, nous voilà : extract

TODO : Image extract

## Extraire une information

Depuis notre univers, on peut extraire une valeur : celle de la case que l'on est en train d'observer !

`extract : : Universe a -> a`

# Comonades, nous voilà : duplicate

TODO : Image du ruban de rubans

## L'opération duplicate

Il est question de construire un univers où chaque case du ruban contient elle même... un univers. Il s'agit de contenir tous les shift possible de notre univers de départ.

duplicate : : Universe  $a \rightarrow$  Universe (Universe  $a$ )

# Loi de convolution

TODO : Image convolution

## La loi de notre automate

Notre automate est décrit par une fonction qui, à un univers, associe l'état de la cellule observé à la prochaine itération. On a donc accès à tout l'univers.

## Rule 30

Pour Rule 30, on a besoin de la cellule couramment observé, et de ses voisines de droite et de gauche.

rule : : Universe  $a \rightarrow a$

# Loi de convolution

TODO : Image convolution

## La loi de notre automate

Notre automate est décrit par une fonction qui, à un univers, associe l'état de la cellule observé à la prochaine itération. On a donc accès à tout l'univers.

## Rule 30

Pour Rule 30, on a besoin de la cellule couramment observé, et de ses voisines de droite et de gauche.

rule : : Universe  $a \rightarrow a$

# Loi de convolution

TODO : Image convolution

## La loi de notre automate

Notre automate est décrit par une fonction qui, à un univers, associe l'état de la cellule observé à la prochaine itération. On a donc accès à tout l'univers.

## Rule 30

Pour Rule 30, on a besoin de la cellule couramment observé, et de ses voisines de droite et de gauche.

rule : : Universe  $a \rightarrow a$

# L'évaluation est comonadique

## Comment obtenir l'itération $n+1$ depuis l'itération $n$ ?

Nous disposons maintenant de tous les outils pour, en une ligne, décrire l'itération au rang  $n + 1$  depuis l'univers au rang  $n$ .

La pipeline :

- On duplique notre univers :  
duplicate : : Universe a -> Universe (Universe a)
- On map notre règle sur chaque case :  
fmap rule : : Universe (Universe a) -> Universe a

fmap rule . duplicate : : Universe a -> Universe a

# L'évaluation est comonadique

## Comment obtenir l'itération $n+1$ depuis l'itération $n$ ?

Nous disposons maintenant de tous les outils pour, en une ligne, décrire l'itération au rang  $n + 1$  depuis l'univers au rang  $n$ .

### La pipeline :

- On duplique notre univers :  
duplicate : Universe a  $\rightarrow$  Universe (Universe a)
- On map notre règle sur chaque case :  
fmap rule : : Universe (Universe a)  $\rightarrow$  Universe a

fmap rule . duplicate : : Universe a  $\rightarrow$  Universe a

# L'évaluation est comonadique

## Comment obtenir l'itération $n+1$ depuis l'itération $n$ ?

Nous disposons maintenant de tous les outils pour, en une ligne, décrire l'itération au rang  $n + 1$  depuis l'univers au rang  $n$ .

### La pipeline :

- On duplique notre univers :  
duplicate : Universe a  $\rightarrow$  Universe (Universe a)
- On map notre règle sur chaque case :  
fmap rule : : Universe (Universe a)  $\rightarrow$  Universe a

fmap rule . duplicate : : Universe a  $\rightarrow$  Universe a