

# Leçon de clôture

## *Plaidoyer pour les trajectoires non-linéaires*

Gérard Berry

Professeur au Collège de France  
Chaire Algorithmes, machines et langages

<http://www.college-de-france.fr/site/gerard-berry>

*26 février 2019*

# *Chaires successives*

Innovation technologique Liliane Bettencourt

2007-2008. Pourquoi et comment le monde devient numérique

Informatique et sciences numériques (Inria)

2009-2010. Penser, modéliser et maîtriser le calcul informatique

Algorithmes, machines et langages

2012-2013. L'informatique du temps et des événements

2013-2014. Le temps élargi : horloges multiples, temps discret, temps continu

2014-2015. Prouver les programmes : pourquoi, quand, comment ?

2015-2016. Structures de données et algorithmes pour la vérification formelle

2016-2017. *Année sympathique*, livre « L'hyperpuissance de l'informatique »

2017-2018. Esterel de A à Z

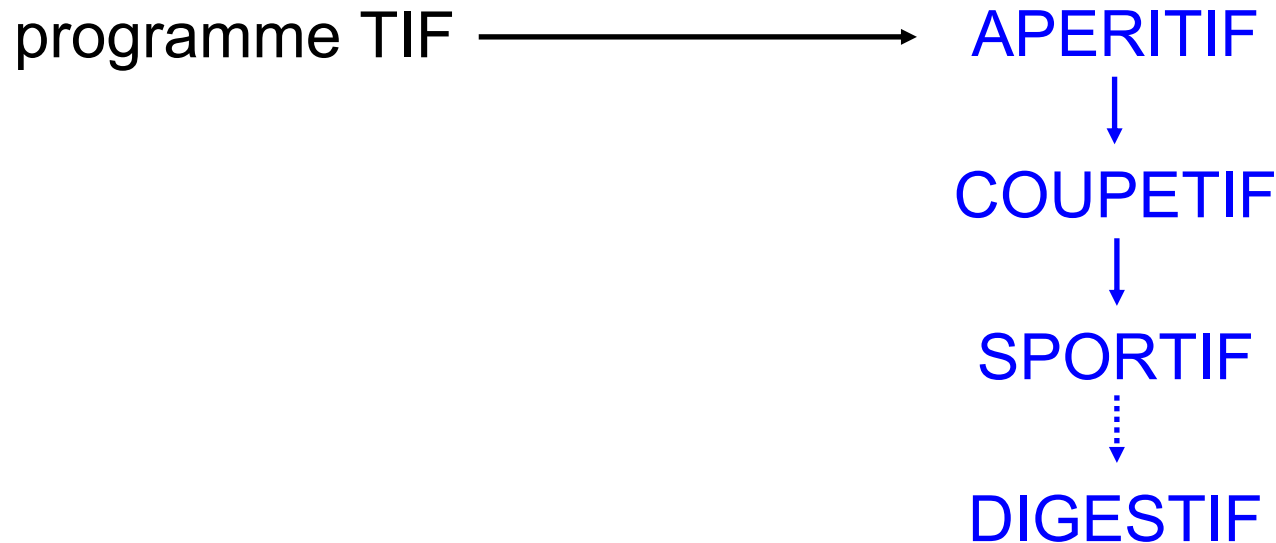
2018-2019. Où va l'informatique ?



Calendrier Shadok, Ed. Chêne

# 1970-73 : TIF – Traitement et interrogation de fichiers

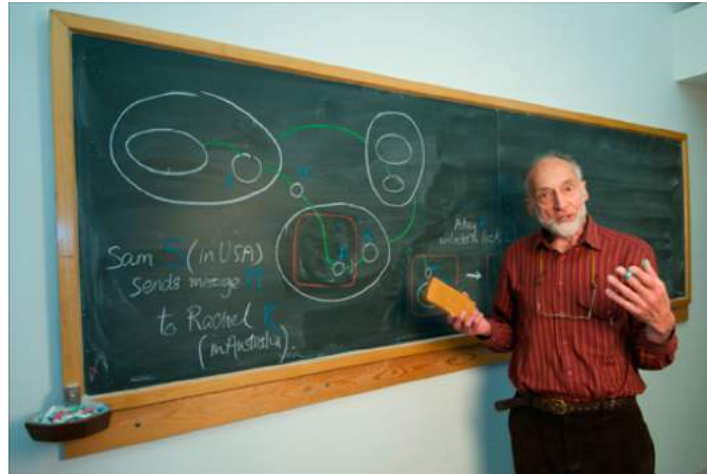
## Compilateur multipasses



En informatique, il est essentiel  
de bien nommer ses objets

# *Premières vraies expériences*

- Retrouvailles avec Philippe Flajolet et Jean-Marc Steyaert  
– DEA Jussieu, [M. Nivat](#) → IRIA Rocquencourt
- Congrès ALGOL 68 : [M. Nivat](#) et [H. Bekic](#) votent !
- Amsterdam 1971 (?) : [Dana Scott](#) présente  $D^\infty$
- USA 1972 : (Ski à Alta  $\Rightarrow$  genou tordu) → [Robin Milner](#), LCF



On n'est jamais à l'abri d'un coup de bol !

# 1972-1977 : Mines & IRIA

- Une bande de joyeux lurons arrivés là un peu par hasard grâce à J-L. Lions :
  - M-P Schützenberger, M. Nivat et J-M Cadiou
  - B. Courcelle, P. Flajolet, G. Huet, G. Kahn, J-J. Lévy, J-M. Steyaert, J. Vuillemin, puis J-R. Abrial, J-M. Hullot, B. Serlet
- Deux sujets :
  - algorithmes et complexité
  - programmation et sémantique
- Deux phases
  - inversion des programmes récursifs → thèse de 3<sup>e</sup> cycle
  - séquentialité, réécriture et  $\lambda$ -calcul → thèse d'Etat

# Inverser les calculs récurrents (1973)

$\text{fib}(n) = \text{si } n=0 \text{ ou } n=1 \text{ alors } 1$   
 $\text{sinon } \text{fib}(n-1) + \text{fib}(n-2)$

$\text{fib}(4) = \text{fib}(3) + \text{fib}(2)$   
 $= (\text{fib}(2) + \text{fib}(1)) + (\text{fib}(1) + \text{fib}(0))$   
 $= ((\text{fib}(1) + \text{fib}(0)) + 1) + (1 + 1)$   
 $= ((1 + 1) + 1) + (1 + 1)$   
 $= 5$

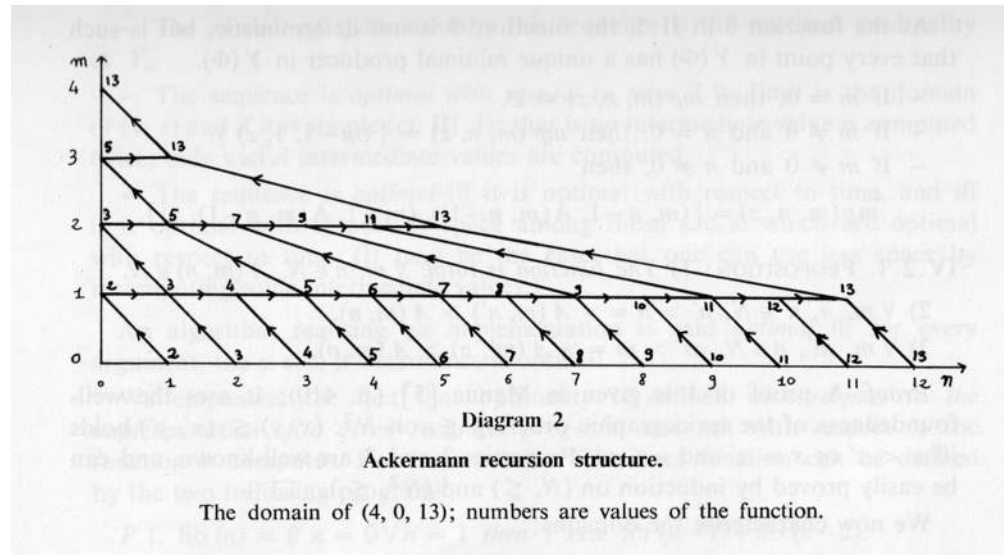


1 1 2 3 5 8 13 ...



# Plus dur : inverser Ackermann !

$Ack(m, n) =$  si  $m=0$  alors  $n+1$   
sinon si  $n=0$  alors  $Ack(m-1, 1)$   
sinon  $Ack(m-1, Ack(m, n-1))$



**Théorème** : l'algorithme de Rice est optimal en temps et en mémoire par rapport au graphe de dépendance



# Mais quand peut-on bien inverser le calcul ?

Quand il est suffisamment **déterministe** !

A éviter : le **ou parallèle** **por**

$$\begin{aligned}\text{por}(\perp, \perp) &= \text{por}(\text{ff}, \perp) = \text{por}(\perp, \text{ff}) = \perp \\ \text{por}(\perp, \text{tt}) &= \text{por}(\text{tt}, \perp) = \text{por}(\text{tt}, \text{tt}) = \text{tt} \\ \text{por}(\text{ff}, \text{ff}) &= \text{ff}\end{aligned}$$



Fonctions **stables** : évitent **por**

$$\forall x, y. x \uparrow y \Rightarrow f(x \wedge y) = f(x) \wedge f(y)$$

La **fonction de Gustave**

$$\begin{aligned}\text{Gus}(\perp, \perp, \perp) &= \perp \\ \text{Gus}(\perp, \text{tt}, \text{ff}) &= \text{tt} \\ \text{Gus}(\text{ff}, \perp, \text{tt}) &= \perp \\ \text{Gus}(\text{tt}, \text{ff}, \perp) &= \perp\end{aligned}$$



*Gérard Huet  
au sommet du Grand Bec*

# Modèles complètement adéquats et stables du $\lambda$ -calcul typé (1979)

Pris séparément, on comprend tous les mots !

**Full Abstraction Problem** : quelles fonctions mathématiques peut-on calculer dans un langage séquentiel comme C ou ML ?

**Ma thèse** : on peut construire un modèle stable plus fin que le modèle des fonctions continues de Scott, car il élimine **por**. Mais il ne résout pas le problème car il contient **Gus**, qui n'est pas définissable de façon séquentielle

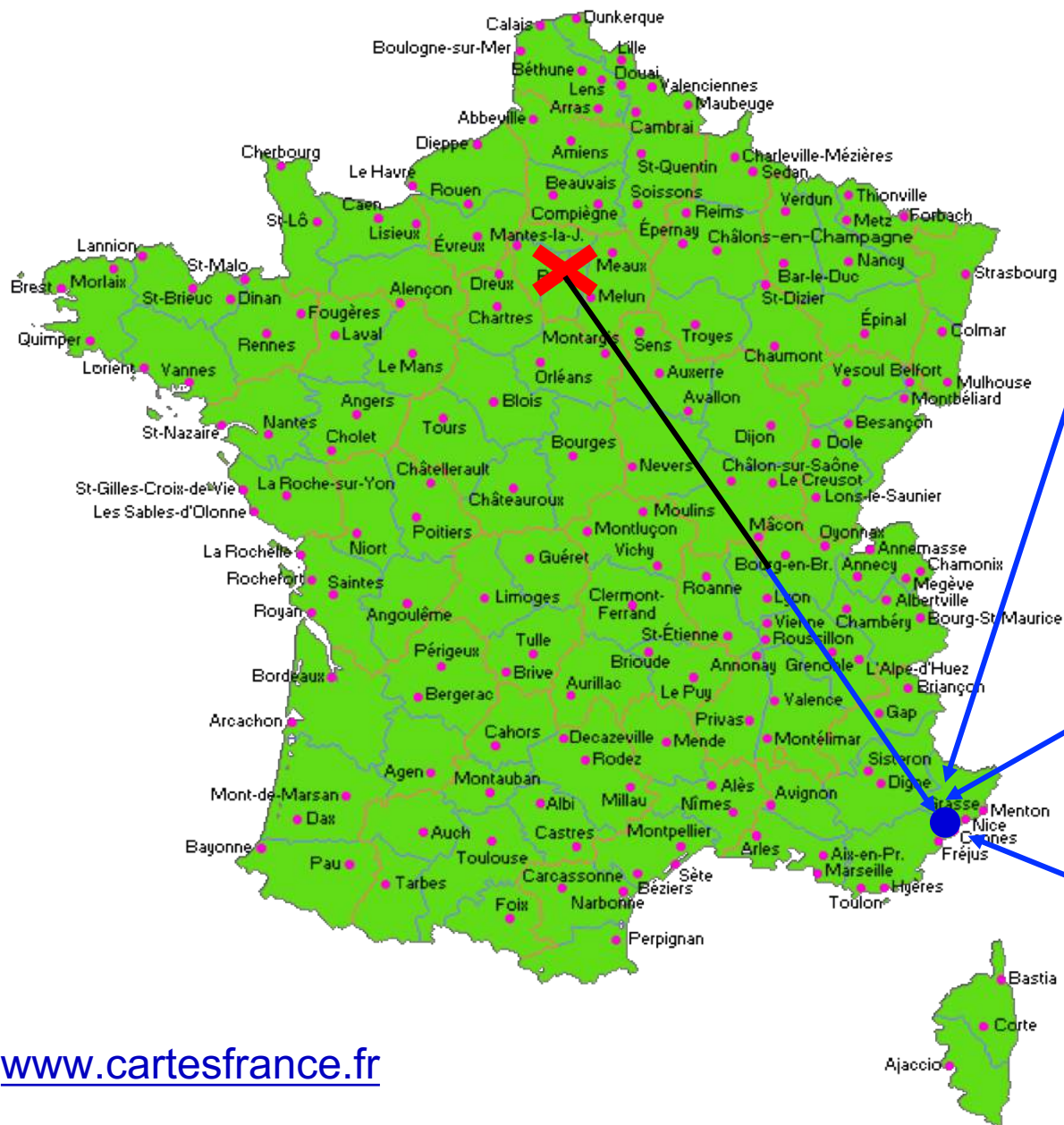
J-Y Girard : les fonctions stables fournissent un modèle du  $\lambda$ -calcul d'ordre supérieur **System F**  
→ espaces cohérents

Étudions les projections finies sur les espaces fonctionnels.

4.6.8. Proposition: Soient  $D$  et  $D'$  deux  $dI$ -domaines, soient  $\{\Psi_n\}$  et  $\{\Psi'_n\}$  des  $\leq$ -suites inverses de projections finies stables sur  $D$  et  $D'$ . Alors la suite  $\{(\Psi_n \rightarrow \Psi'_n)\}$  définie par  $(\Psi_n \rightarrow \Psi'_n)(h) = \Psi'_n \circ h \circ \Psi_n$  est une  $\leq$ -suite inverse de projections finies stables sur  $\langle [D \xrightarrow{s} D'] \rangle, \leq, \perp \rangle$  qui est un  $dI$ -domaine.

preuve: Par 4.4.18,  $(\Psi_n \rightarrow \Psi'_n)$  est stable et est l'interprétation de  $\lambda h: \Psi'_n \circ h \circ \Psi_n$  dans la  $\Omega$ -catégorie  $\langle D \wedge C - S, \leq \rangle$ . On a alors immédiatement  $(\Psi_n \rightarrow \Psi'_n) \leq (\Psi_{n+1} \rightarrow \Psi'_{n+1}) \leq (1_D \rightarrow 1_{D'}) = 1_{[D \xrightarrow{s} D']}$  et  $\bigvee_n (\Psi_n \rightarrow \Psi'_n) = (1_D \rightarrow 1_{D'}) = 1_{[D \xrightarrow{s} D']}$ . On a aussi  $(\Psi_n \rightarrow \Psi'_n) \circ (\Psi_n \rightarrow \Psi'_n) = (\Psi_n \rightarrow \Psi'_n)$ . La finitude de  $(\Psi_n \rightarrow \Psi'_n)([D \xrightarrow{s} D'])$  se montre exactement comme en 3.4.11. Alors  $\{(\Psi_n \rightarrow \Psi'_n)\}$  est bien une  $\leq$ -chaîne inverse de projections finies stables sur  $[D \xrightarrow{s} D']$ , qui est un  $dI$ -domaine par 4.6.7.  $\square$

# 1977 Paris → Sophia-Antipolis



# *Suite des modèles du lambda-calcul*

## *Les algorithmes séquentiels avec P-L. Curien*

fonctions → algorithmes séquentiels

structures de données concrètes de Kahn - McQueen

dualité catégorique programmes / fonctions + stratégies

### *On the Definition of Lambda-calculus Models*

G. Berry

Proc. Int. Coll. on Formalization of Programming Concepts, Peñiscola, Spain, Lecture Notes in Computer Science 107, Springer-Verlag (1981) 218-230.

Modèles fonctionnels → catégories cartésiennes fermées

~~Mais 3 papiers simultanés de gens plus connus définissent les modèles comme nécessairement fonctionnels...~~

3-1, perdu !



# *De la théorie à la pratique, enfin !*

Thm : Plan calcul + IRIS 80 salés / noyés  $\Rightarrow$  **théorie**

Preuve : interdiction d'acheter les machines américaines nécessaires pour nos recherches (PDP-10 puis Vax)

Exception : l'IRCAM, PDP-10 exigé par **Pierre Boulez !**

1982 : création des GRECO Programmation, C3, etc  
achat d'un **VAX 750** à Bordeaux, **merci M. Combarous**

Gérés par les chercheurs, administration légère



Loi de Moore  $\rightarrow$  Loi de l'administration

Le nombre de pages à remplir double tous les 2 ans



# Implémentation : le langage CDS (en LeLisp)

CDS, le langage des années 90  
(siècle non précisé)



# *Et toujours quelques visites à Rocquencourt...*

Participation à **Ceyx** et **Bigmacs**,  
le langage objet et l'emacs multi-fenêtre de **J-M. Hullot**  
**CxYacc**, Yacc en Ceyx avec **B. Serlet**

Question : comment a fait Bertand Serlet pour me casser  
un œuf cru sur la tête, avec mon consentement ?



# 1982 : la naissance d'Estereel



... Chronométrage sur le circuit II.

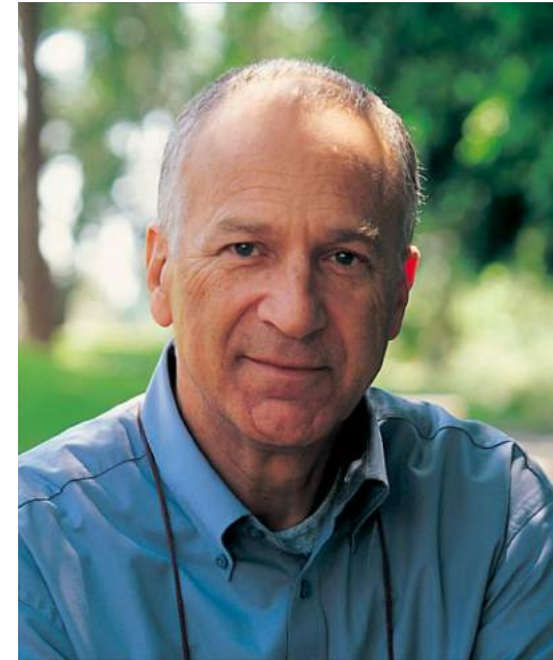
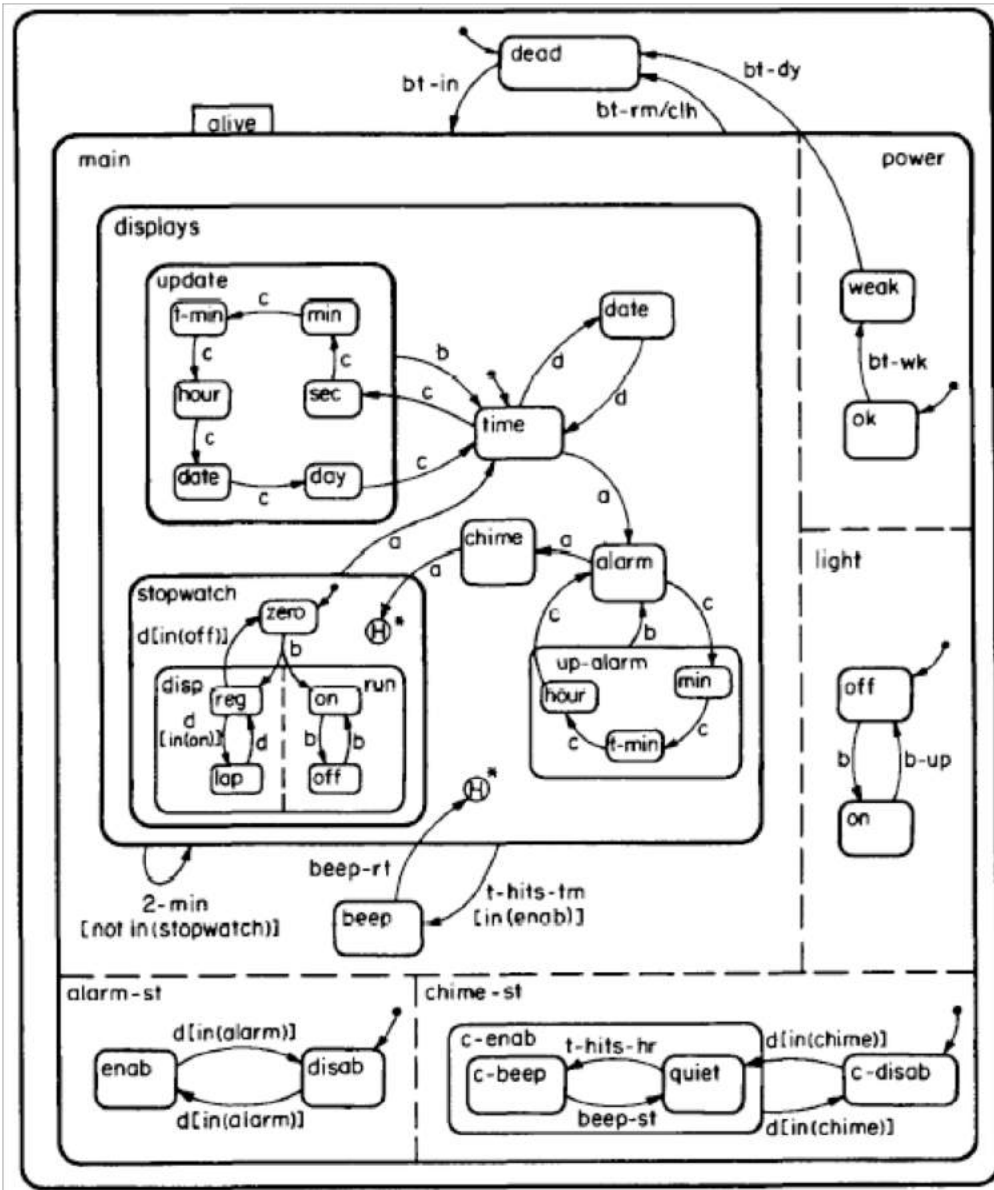


Le premier prix est attribué au Microtel Club de Bordeaux qui arrache la victoire en parcourant les 108 mètres représentant deux tours du grand circuit en 34 secondes et 15 centièmes.



La remise du deuxième prix à M. Wybo, 46 secondes pour les deux tours.

# Statecharts, David Harel (1987)



Un formalisme  
graphique fondateur

# *Des débuts au passage à l'échelle*

1983 : design du langage, J-P. Rigault, J-P. Marmorat, S. Moisan

1984 : première sémantiques, premier compilateur, L. Cosserat

1985 : Esterel v2, P. Couronné

Intérêt de Dassault Aviation (E. Ledinot), Bertin, Thomson

1987 : début de la thèse de G. Gonthier

Esterel v3, R. Bernhard, F. Boussinot, J-P. Rigault,  
J-P. Marmorat, J-P. Paris, A. Ressouche, J-M. Tanzi, ...

1989 : Vérification formelle avec Auto (R. De Simone, D. Vergamini  
et Autograph (V. Roy)

1990 : industrialisation par CISI Ingénierie puis ILOG

1991 : applications aux FPGAs, avec J. Vuillemin

1992 : Esterel v4 : nouvelle sémantique / compilation par circuits  
Liaison avec les prouveurs BDDs (O. Coudert, J-C. Madre,  
H. Touati)



# Papiers à lire et à ne pas lire

~~The Synchronous Programming Language ESTEREL: Design, Semantics, Implementation~~

~~G. Berry and G. Gonthier.~~

~~Science of Computer Programming, vol. 19, no. 2 (1993) 87-152~~

**En 2 ans, les reviewers n'ont jamais répondu !**

[The Foundations of Esterel](#)

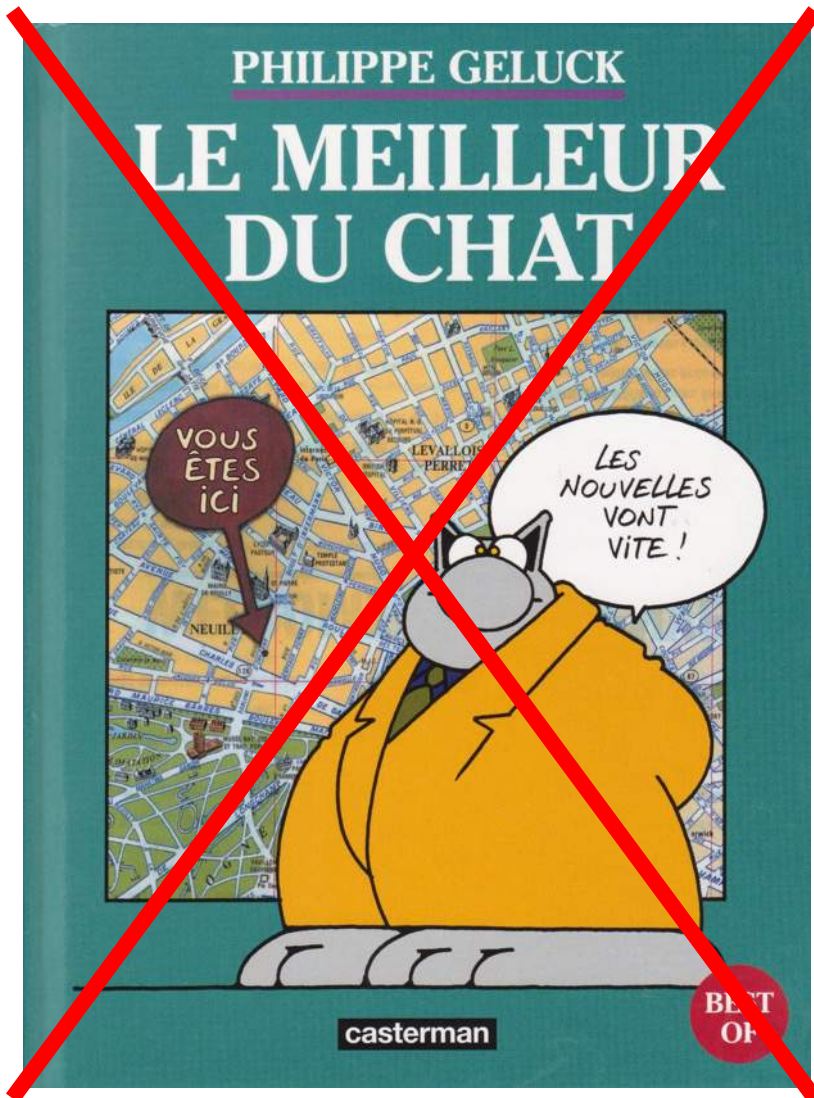
G. Berry. In *Proof, Language and Interaction:*

*Essays in Honour of Robin Milner,*

MIT Press, Foundations of Computing Series, 2000.

Juger les chercheurs et les papiers au nombre de citations est absurde, **il n'y a que peu de rapport entre citer et lire !**

# Communication instantanée et causalité selon le Chat de Philippe Geluck



après, mais en même temps !

# 1994-2001

1992 : Première résolution du problème de la causalité en Esterel avec **T. Shiple** (vraiment résolu en 2012 avec **M. Mendler**)

1995- : Coopération avec **Synopsys** et **Cadence** (CAO de circuits)

1997-2001 : Coopération avec Intel (**M. Kishinevsky**)

Définition d'**Esterel v7**, version HW très étendue



Budget : trois grants annuels

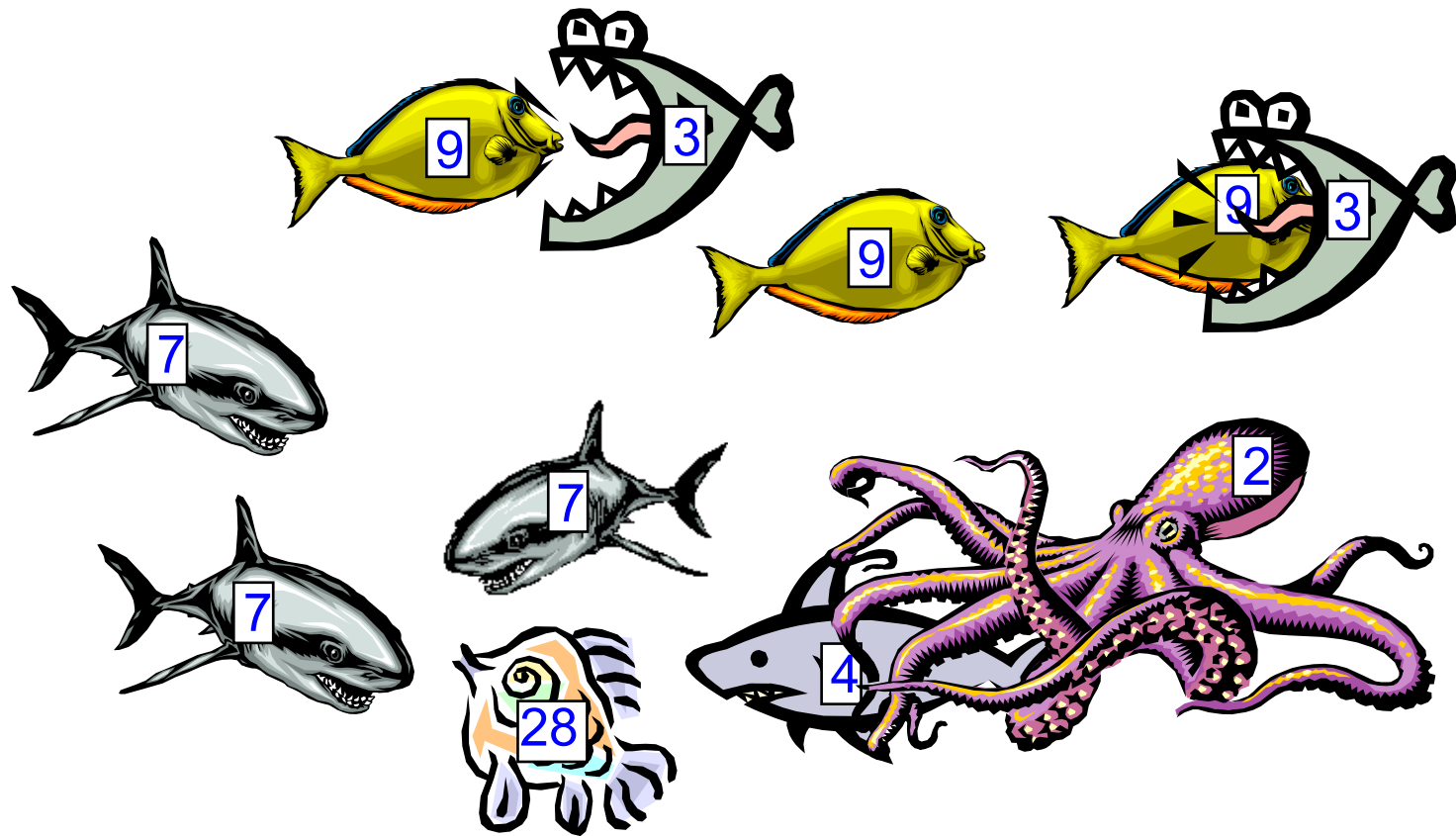
**Intel** : 70 000 \$

**Synopsys** : 50 000 \$

**Cadence** : 30 000 \$

... sous forme de chèques à découper en bas d'une page  
**no strings attached !**

# Le crible de Darwin : p, kp → p



Gamma : J-P. Banâtre, D. Le Métayer

1989 : The Chemical Abstract Machine (CHAM)

G. Berry , G. Boudol - Prix du meilleur titre à POPL 1990 !

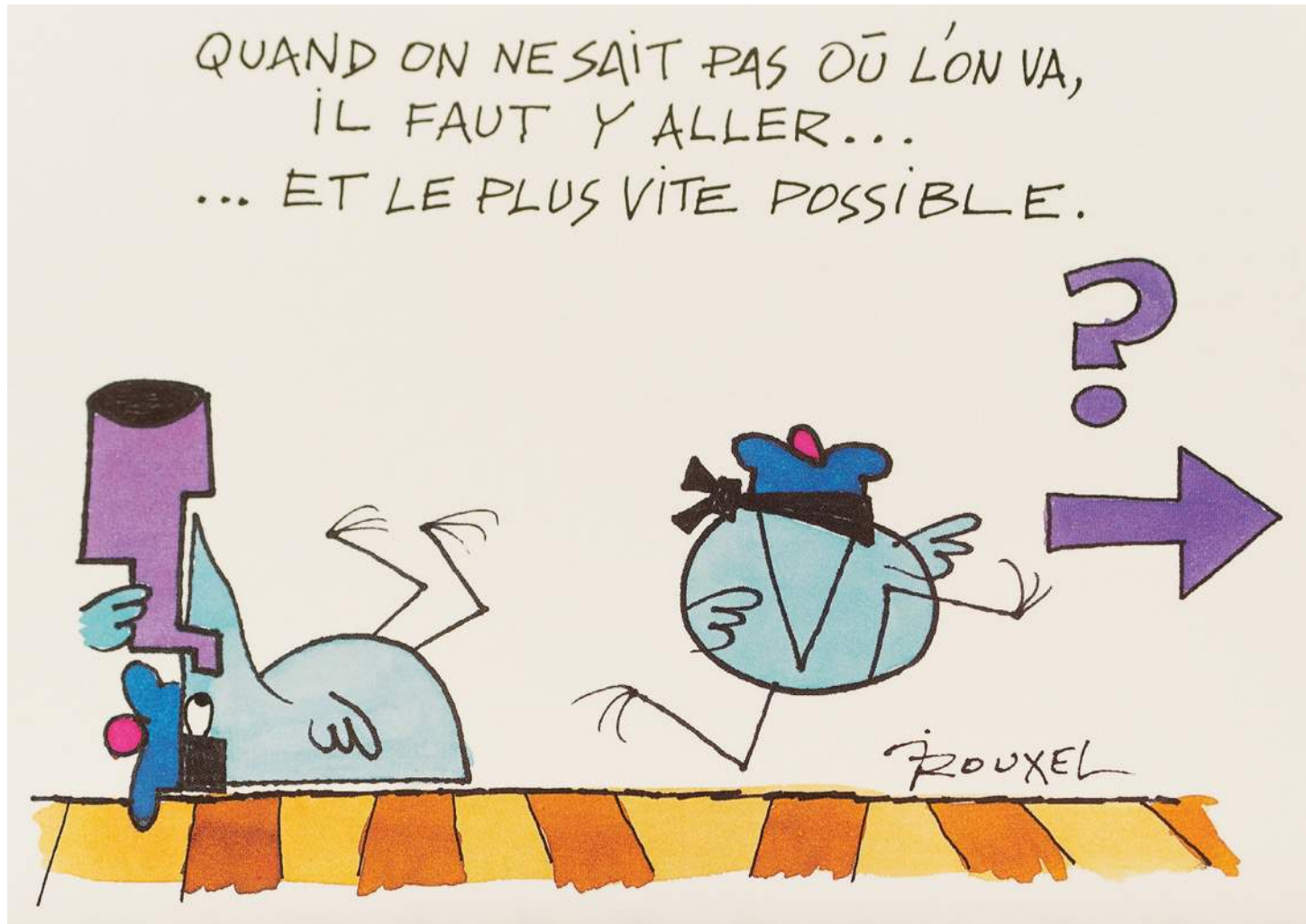


# *Etions-nous les premiers ?*

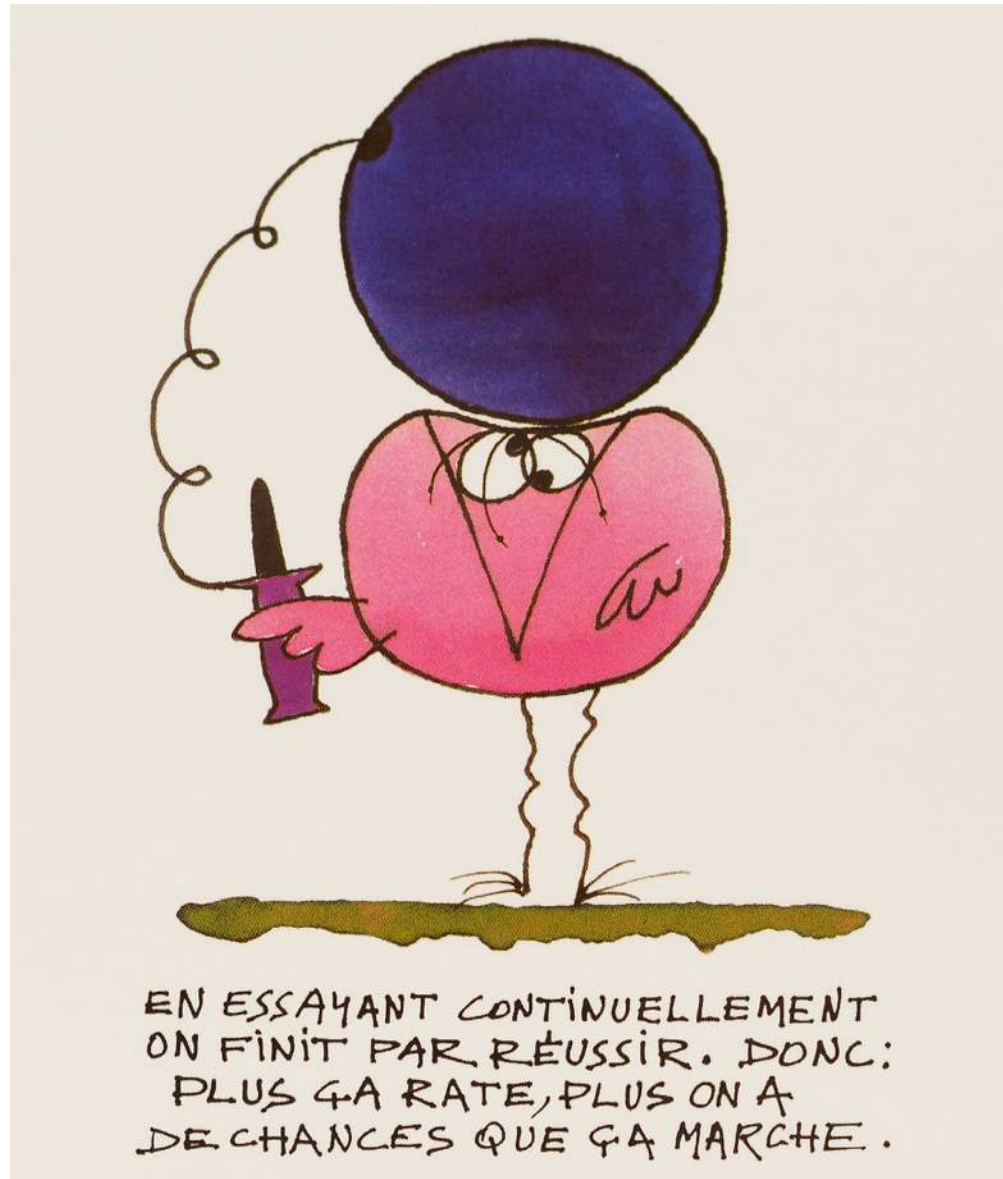
- D'autres chercheurs : si tu lis mon papier de 1985 sur la réécriture catégorique, ça y était déjà !
- Réponse : en 'Pataphysique, ont dit que tu avais fait un plagiat par anticipation !

L'important n'est pas de trouver quelque chose, c'est de s'apercevoir que c'est vraiment important !

*Ne pas avoir de plans trop précis,  
mais ne pas perdre trop de temps !*

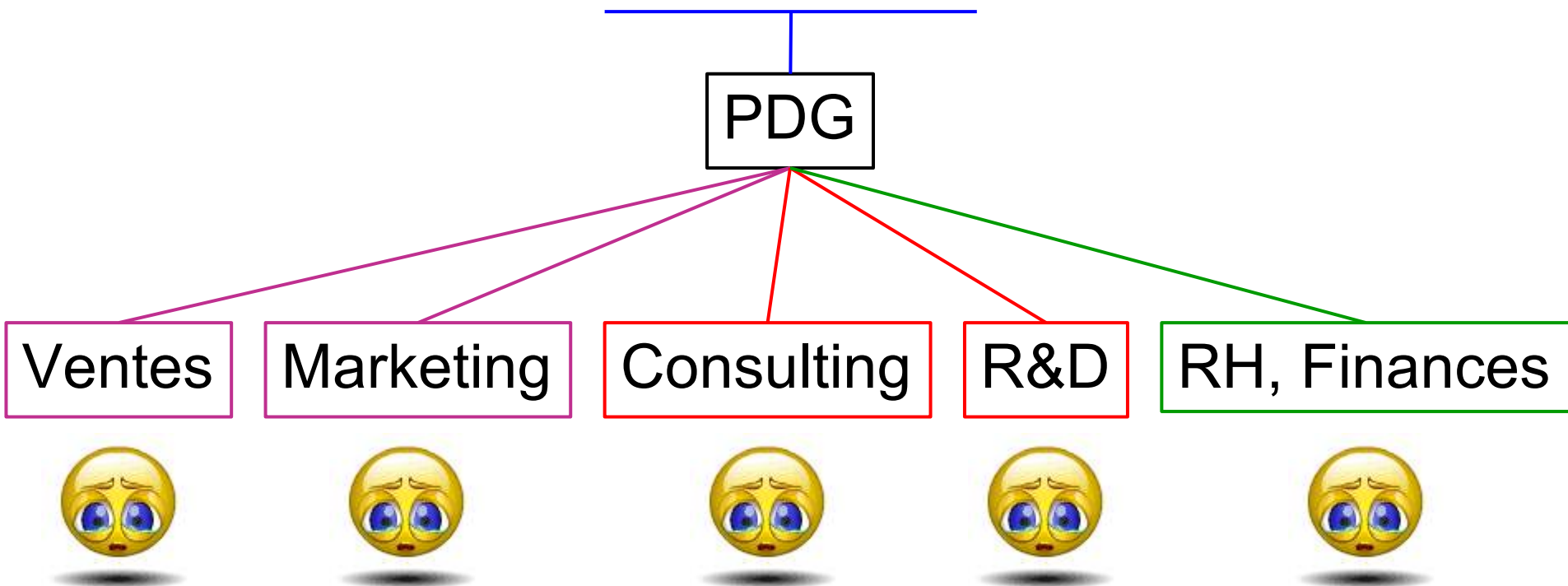


*Et bien sûr, essayer beaucoup...*



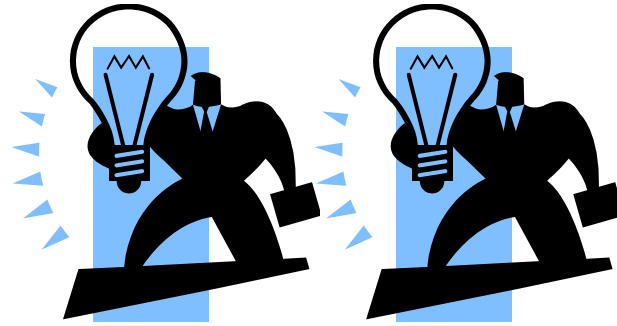
*Calendrier Shadok, Ed. Chêne*

Chers amis, de quoi allons nous mourir, et quand ?



Réponses toutes différentes, toutes intéressantes !

# Réunion client : les questions centrales



- What is your **positioning**, your **value proposition**?

You will take more time to design, but **less to verify**

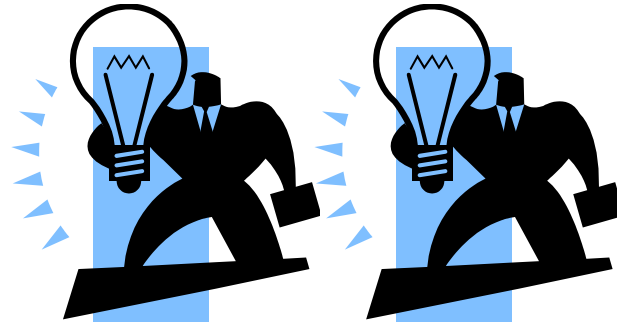
This will improve your **time to market**, which is very important

Esterel is **formal** and **so much better** than Verilog / VHDL !

You will make **less bugs**, save their costs, etc. etc.

- Hmm.... But your product is quite expensive, what will be my **ROI**? How do you **quantify** it?

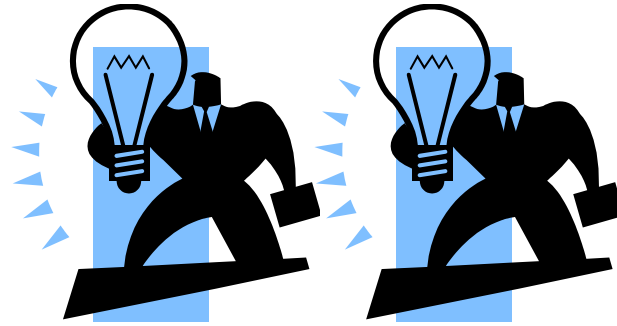
# Réunion client : les questions centrales



- What is your market share ? How solid are you?  
....committed shareholders...fast growth ... ..
- How are your training and maintenance organized?  
... pilot projects...consultants...immediate fix by R&D...
- How will I hire already trained engineers ?  
... free academic license...international universities...

Can you summarize your value proposition?

# Interprétation standard



En quoi pouvez-vous m'aider à résoudre mes problèmes?



aux faits!



doit être votre  
seul objectif



et pas les vôtres !

Parler beaucoup de lui et un peu de nous  
⇒ construction de la confiance  
(structure, techno, engagement)

# Contact avec la recherche

... nettement affaibli



Ancien chercheur



Chercheur

J'ai des idées intéressantes pour toi !

Mais pourquoi ça m'intéresserait?

Il ne me (se) demande pas ce qui peut m'intéresser...

Exception majeure : la thèse d'Olivier Tardieu



# Réunion clients, Juan-Les-Pins, sept. 2018

Exposés de TI, ST, NXP,... :

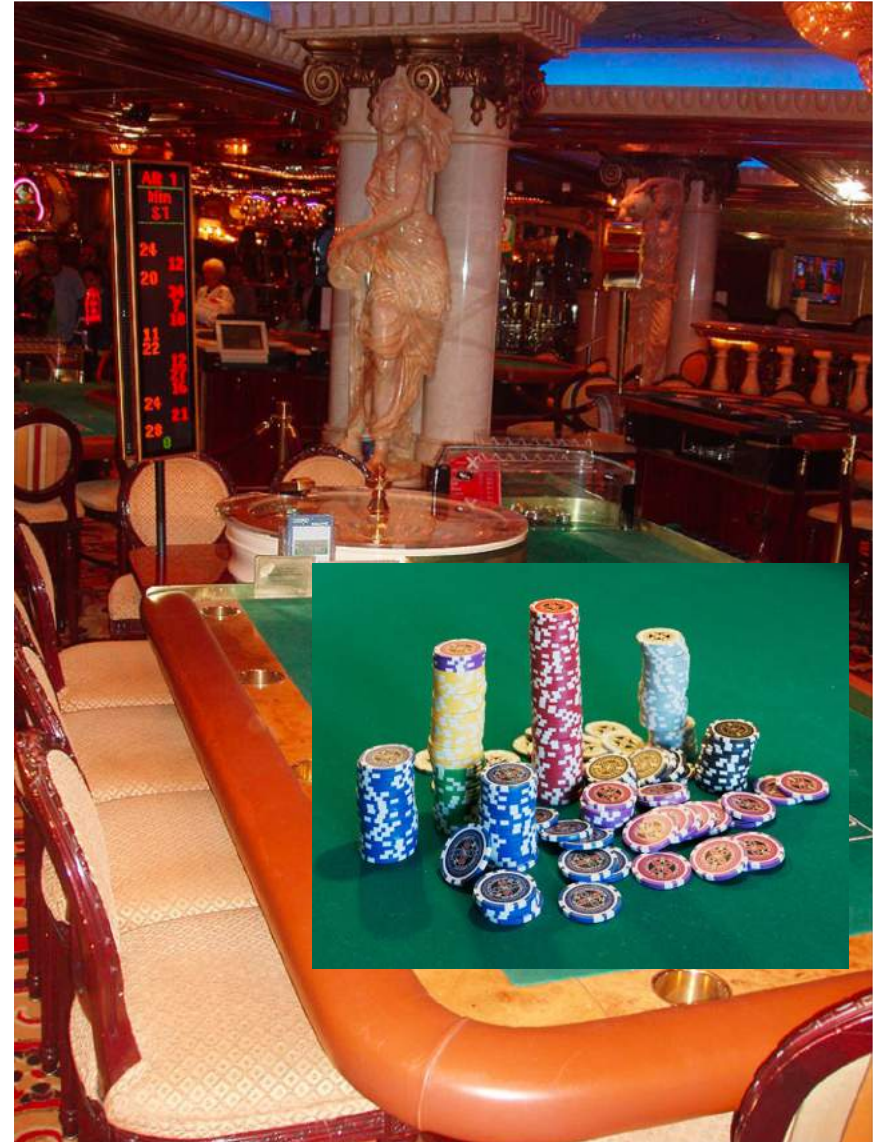
Ça marche super-bien,  
on passer à la taille au dessus !

Mais c'était juste après  
la chute de Lehman Brothers...

Nos clients sont morts,  
et notre branche HW aussi



*Voir cours 2014 1-2-3 à Sophia*



Par Captain-tucker — Travail personnel, CC BY-SA 3.0,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5775825>

# *Lustre et Signal*



Nicolas Halbwachs  
et Albert Benveniste



Paul Caspi

**Lustre** : Caspi / Halbwachs, 1983

→ **SCADE**, 1993. ...

**Signal** : Benveniste, Le Guernic, Gautier 198\*

→ **Sildex**, **Polychrony**

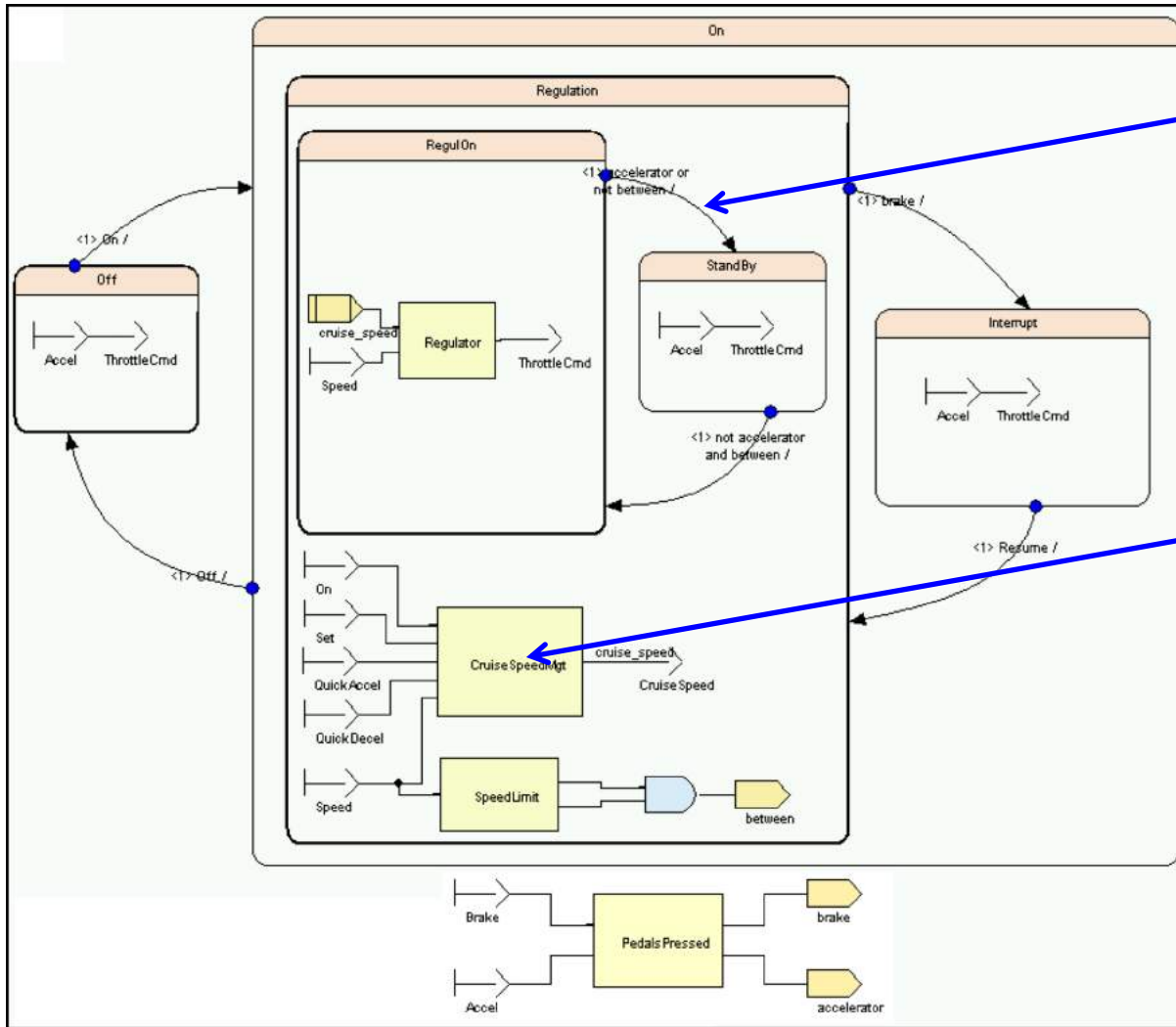
# *Rafale = Esterel, Airbus = SCADE*



Solution 1 : combat aérien

Solution 2 : Esterel Tech rachète SCADE en 2003  
et unifie les langages  
→ Esterel v7, SCADE 6

*voir le séminaire de Bruno Pagano, le 23/04/2013*



automates  
hiérarchiques

diagrammes  
de blocs

Langage fonctionnel  
Tableaux fonctionnels  
Sémantique formelle  
Compilateur certifiable

cf. séminaire de Bruno Pagano, 23/04/2013

# L'enseignement Montessori

1. De la logique Shadok à la vraie logique (6-9 ans) :

Tous les chats sont mortels, Socrate est mortel,  
donc Socrate est un chat

Pas de problème s'il y a un seul chat et qu'il s'appelle Socrate !

2. Comment reconnaît-on un chat d'une chatte à 3 mètres ?

S'il a trois couleurs, c'est une chatte !

On l'appelle. S'il vient, c'est un chat, si elle vient, c'est une chatte.



Et si y vient pas ?

C'est un chat !



3. Diction Shadok : dormir empêche de boire du café !

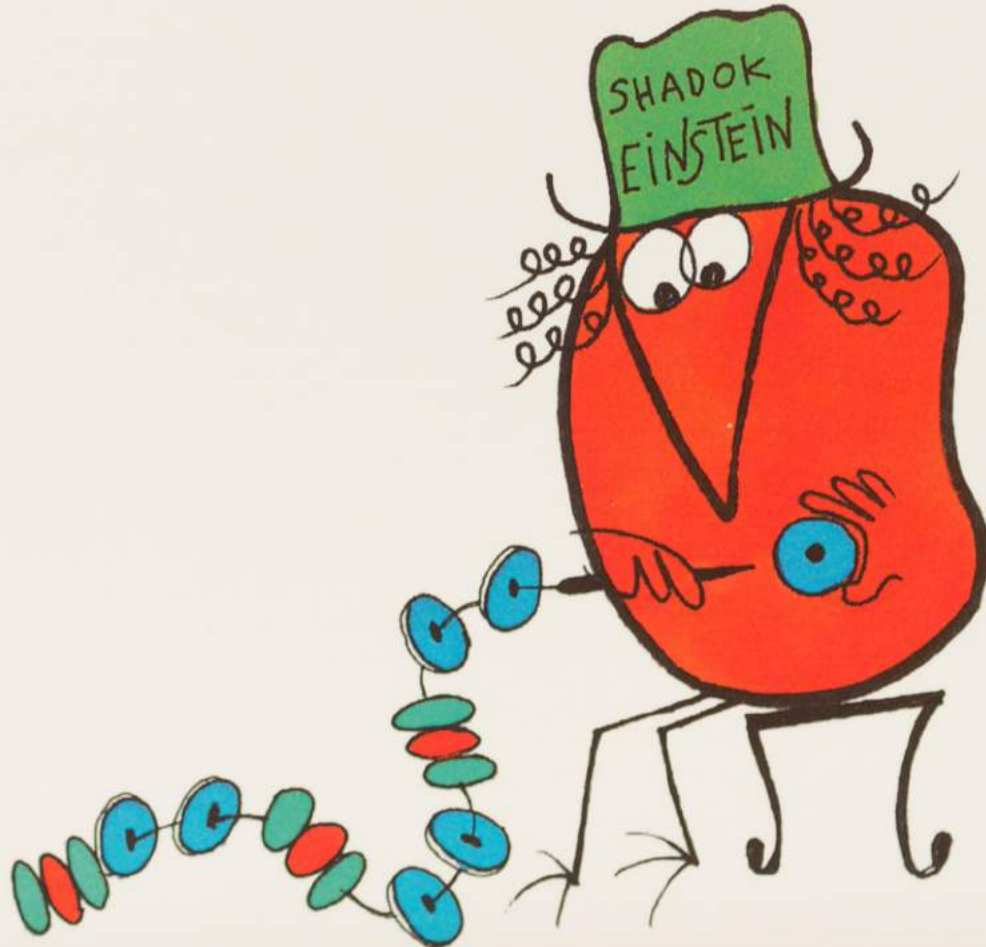
# *Comment se déplace le son ?*

Le son, c'est pas comme la lumière,  
ça prend mieux les virages

Le son se déplace en dansant dans l'air

C'est super, on a tout compris,  
reviens la semaine prochaine !

IL VAUT MIEUX MOBILISER  
SON INTELLIGENCE SUR DES  
CONNERIES QUE MOBILISER  
SA CONNERIE SUR DES  
CHOSSES INTELLIGENTES.



Calendrier Shadok, Ed. Chêne



De la part de la classe de 5<sup>ème</sup>  
Le 20/3/74.



Pour M<sup>me</sup> Berry, ce petit poème :

Le deuxième trimestre est achevé  
Vite il faut nous en aller  
Les vacances vont trop vite passer  
Le troisième trimestre va commencer

Il n'y a pas à en douter  
Vous êtes la reine des fêtes  
Mille fois plus gentilles qu'elles  
Et, encore plus belle.

Laissons de côté les carrés  
La lune et les nombres premiers  
Les preuves, la multiplication  
L'addition et la soustraction



Ne pensons pas aux mathématiques  
Organisons des piques-niques  
Travailler avec vous c'est un bonheur  
Auquel on met tout son cœur.

Les mathématiques avec vous  
Deviennent facile comme tout  
Les dernières difficultés  
Vite, vite, vont s'envoler

Une nouvelle? Vous sympathisez  
Un problème? Vous le résolvez  
Il n'y a pas à dire vous êtes la perle  
Envoyée par tant de merles

Il est vrai que c'est un plaisir  
De se souvenir  
De vous; car vous êtes si gentille  
Que nous vous offrons des lilles



Si en colère vous vous mettez  
On entend les marches voler  
Mais cela n'arrive pas souvent  
Grand bien pour nous, heureux s'en vont



Quel rire vous débouchez  
quand tout d'un coup vous vous escaffez  
Si tout le monde vous adore  
Et dit que vous êtes en or.





# Autres actions

- Entre 25 et 40 confs par an,  $\frac{1}{2}$  scientifiques,  $\frac{1}{2}$  publics variés
- Plusieurs émissions de radio par an (merci [France Culture](#), merci [La tête au carré](#))
- Présidence de conseils scientifiques (X, IRCAM, ESIEE)
- Membre du CS de l'Education nationale, du CA de l'institut Pasteur, du CA de l'IRCAM, de l'OPECST, du CA d'Orange

L'implication des chercheurs en informatique dans les organes de décision et les médias doit être plus grande

[Boris Vian, la Java des bombes atomiques](#) :

L'important, c'est pas le rayon d'action,  
c'est l'endroit où elle tombe !

# La chaire Informatique et sciences numériques

2009 : Gérard Berry  
2010 : Martin Abadi  
2011 : Serge Abiteboul  
2012 : Bernard Chazelle  
2013 : Nicholas Ayache  
2014 : Marie-Paule Cani  
2014 : Yann LeCun  
2015 : Jean-Daniel Boissonnat  
2017 : Claire Mathieu  
2018 : Rachid Guerraoui  
2019 : Walter Fontana



Philippe Manoury



Stéphane Mallat

Merci Inria !



*Toi, à la retraite, je n'y crois pas !*

Mais si, j'ai bien assez de cordes à mon arc  
pour pouvoir changer mon fusil d'épaule !

Merci à tous pour être venus,  
et un très grand merci  
à mes 66 séminaristes