Pourquoi et comment le monde devient numérique

Gérard Berry

Chaire d'innovation technologique Liliane Bettencourt

Collège de France

17 janvier 2008

De grands bouleversements

Communication : Internet, tél. portable, tél. gratuit

Audio-visuel : MP3, photo/vidéo numérique, RDS, TNT, TVHD

Commerce : en ligne

Cartographie : cartes & photos interactives

Transports: GPS, pilotage, sécurité

Industrie: gestion, outillage, CAO, travail à distance

Sciences: modélisation et expérimentation numérique

Médecine: imagerie numérique, chirurgie robotique

Grande industrie qui irrigue toutes les autres

Les quatre piliers du numérique

1. La numérisation de l'information
2. La prodigieuse machine à information
3. La science et la technologie de sa conception et de son usage
4. Un espace d'innovation (presque) sans frein

Les grands jalons

30-45 : pionniers (von Neumann, Turing, Eckert,...)

55-75 : centres de calcul, scientifique, gestion

75-80 : mini-ordinateurs, algorithmique, programmation
télécommunications

80-95 : PC, informatique embarquée
explosion de l'industrie et des applications

95-05 : Internet, téléphone portable
la naissance des grands réseaux

05-15 : audiovisuel, informatique nomade, sans fil
sciences, médecine

15- : informatique ubiquitaire
objets dans le réseau

Alerte aux pucerons !

- infestation massive par pucerons enfouis partout
- qui peuvent communiquer entre eux
- mais de plus en plus d'applications critiques

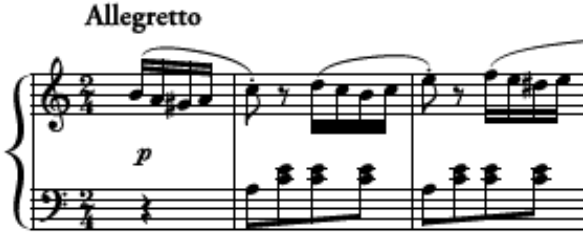
Autrefois : dépendance information / support

Autrefois : dépendance information / support

Quel beau texte!
Quelles belles équations!

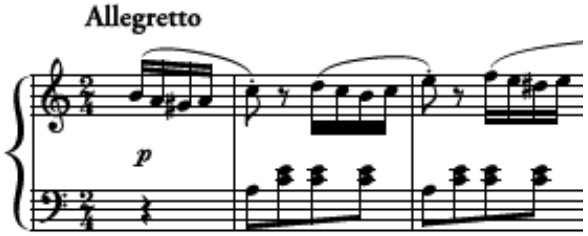
Autrefois : dépendance information / support

Quel beau texte!
Quelles belles équations!



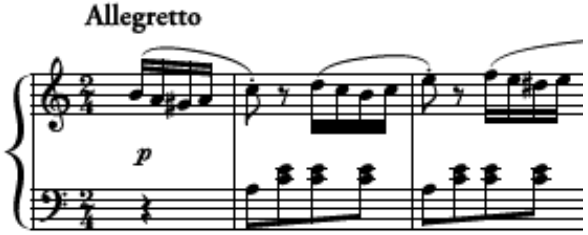
Autrefois : dépendance information / support

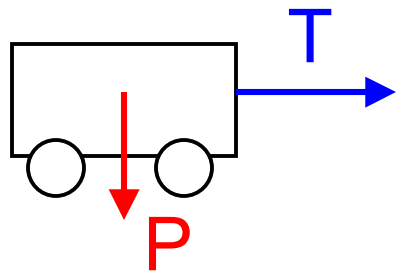
Quel beau texte!
Quelles belles équations!

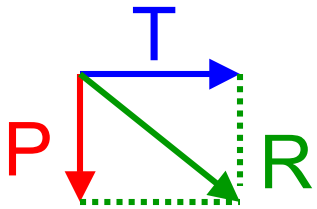


Autrefois : dépendance information / support

Quel beau texte!
Quelles belles équations!



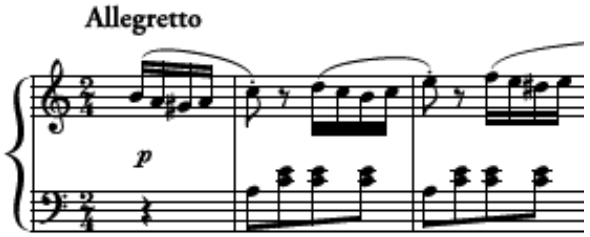


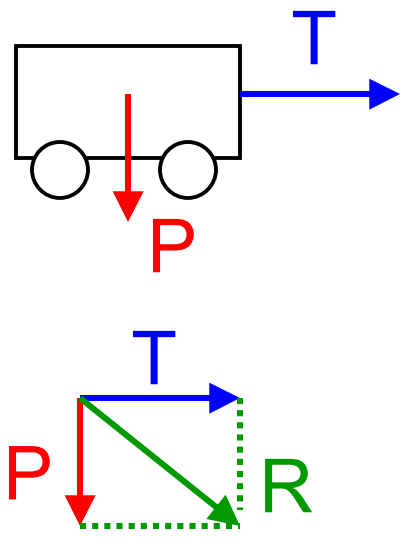


source Ressort Mécanique

Maintenant : indépendance et convergence

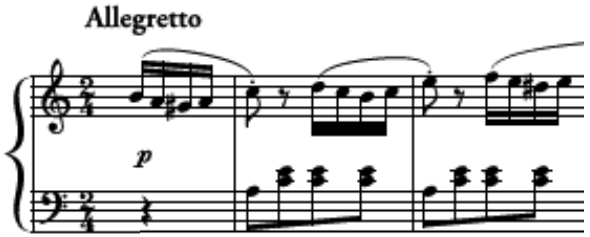
Quel beau
texte!
Quelles belles
équations!



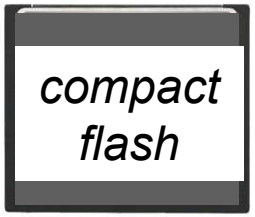


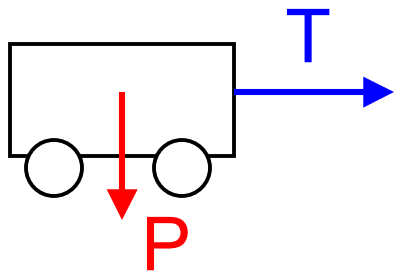
Maintenant : indépendance et convergence

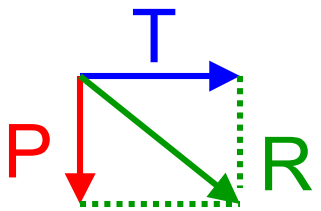
Quel beau
texte!
Quelles belles
équations!



01100110111101
10010011101100



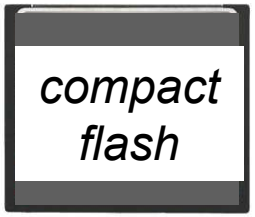




... sans abandon exagéré

01100110111101

10010011101100



... sans abandon exagéré

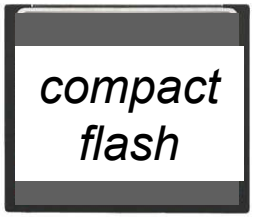
01100110111101
10010011101100

compact flash

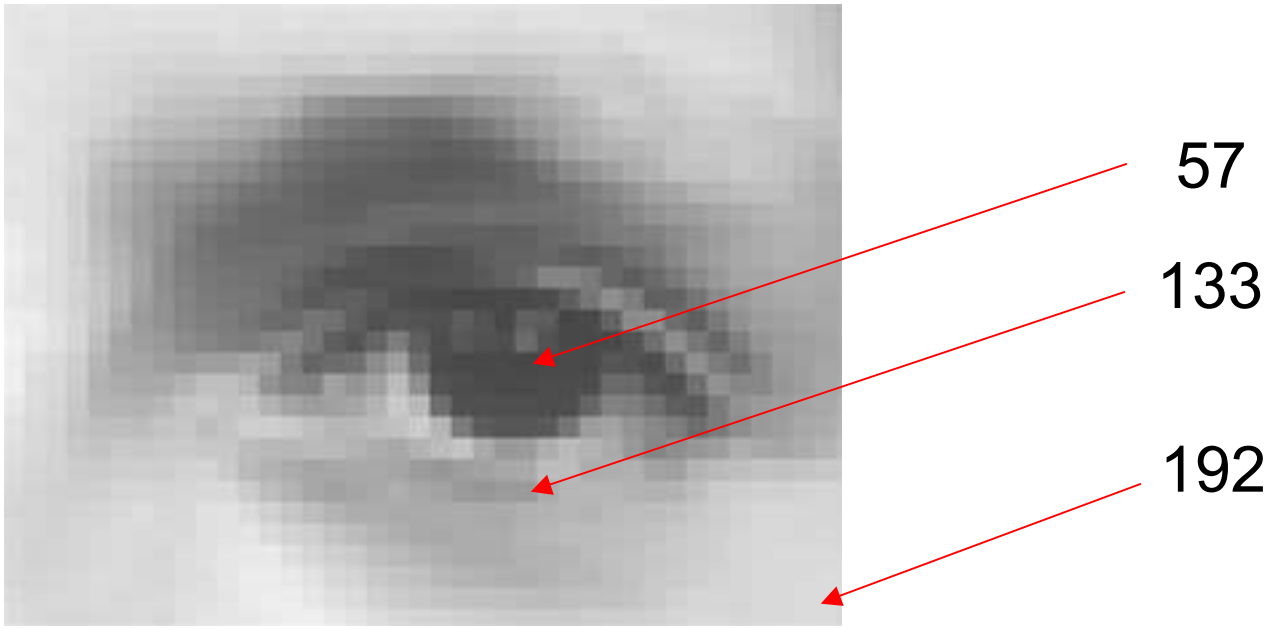
source Ressort Mécanique

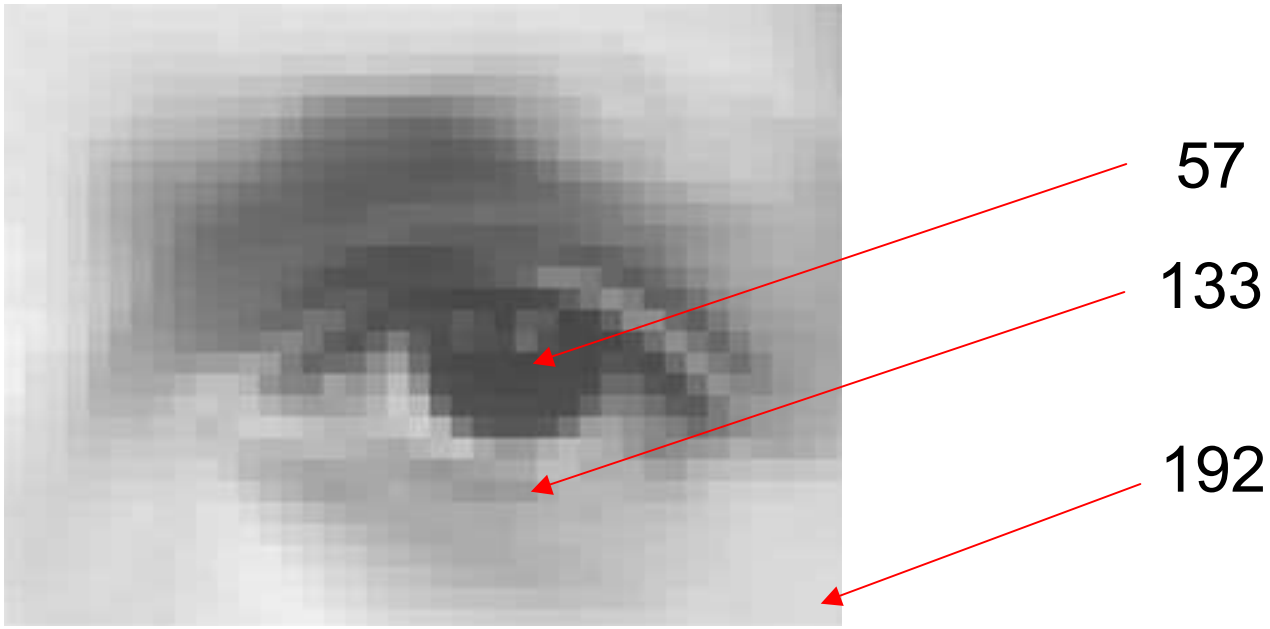
... sans abandon exagéré

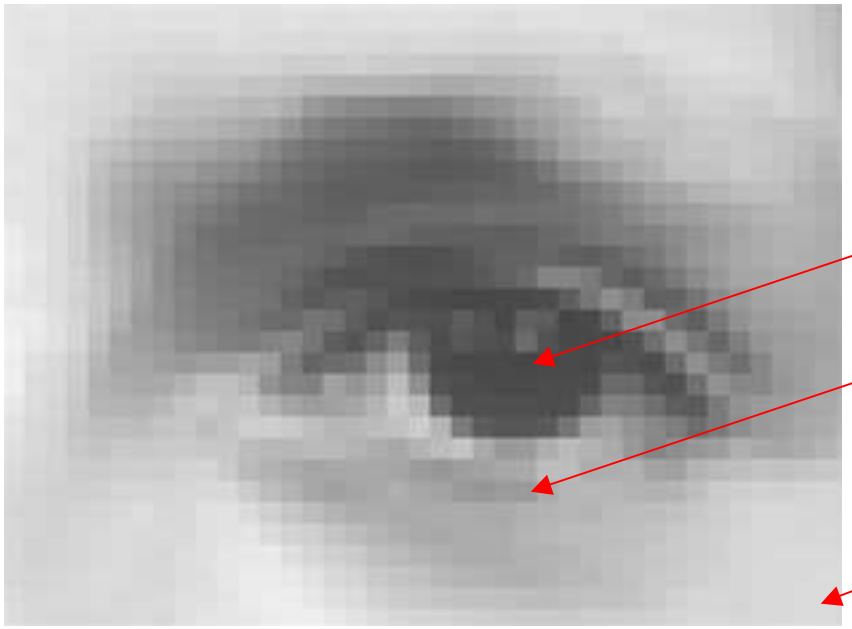
01100110111101
10010011101100

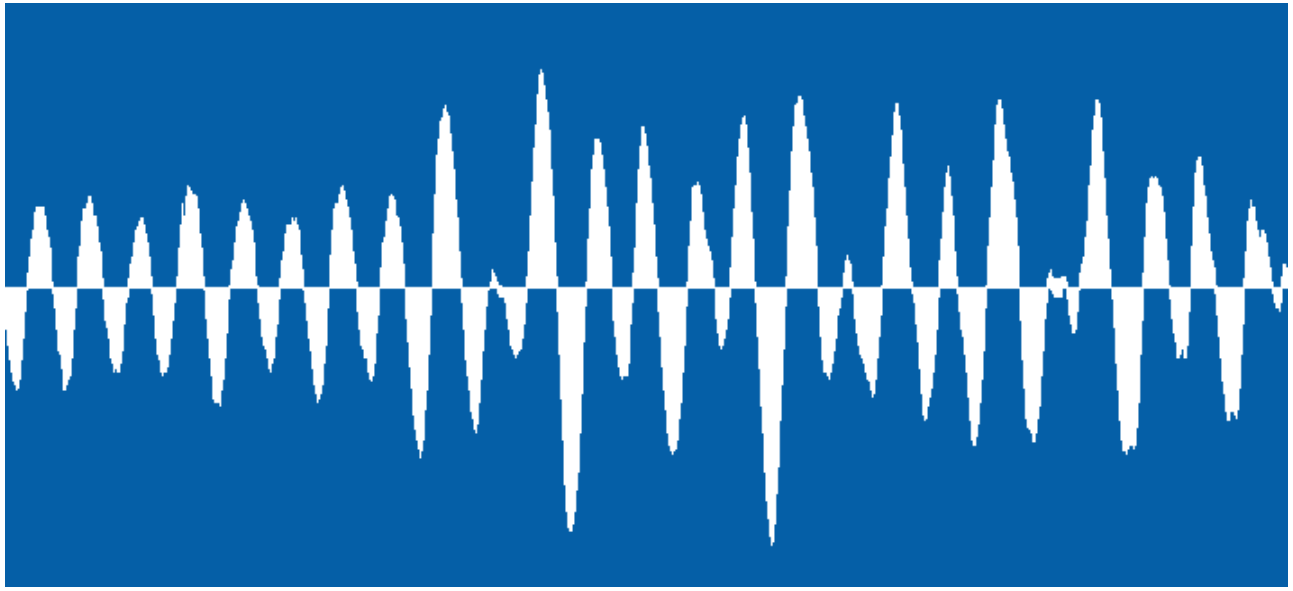


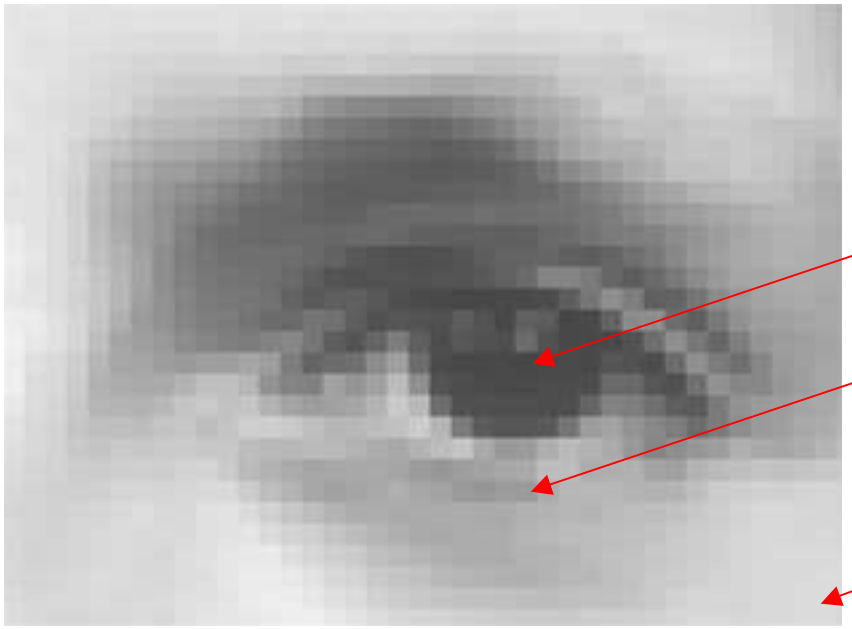
Source Berger Lahr

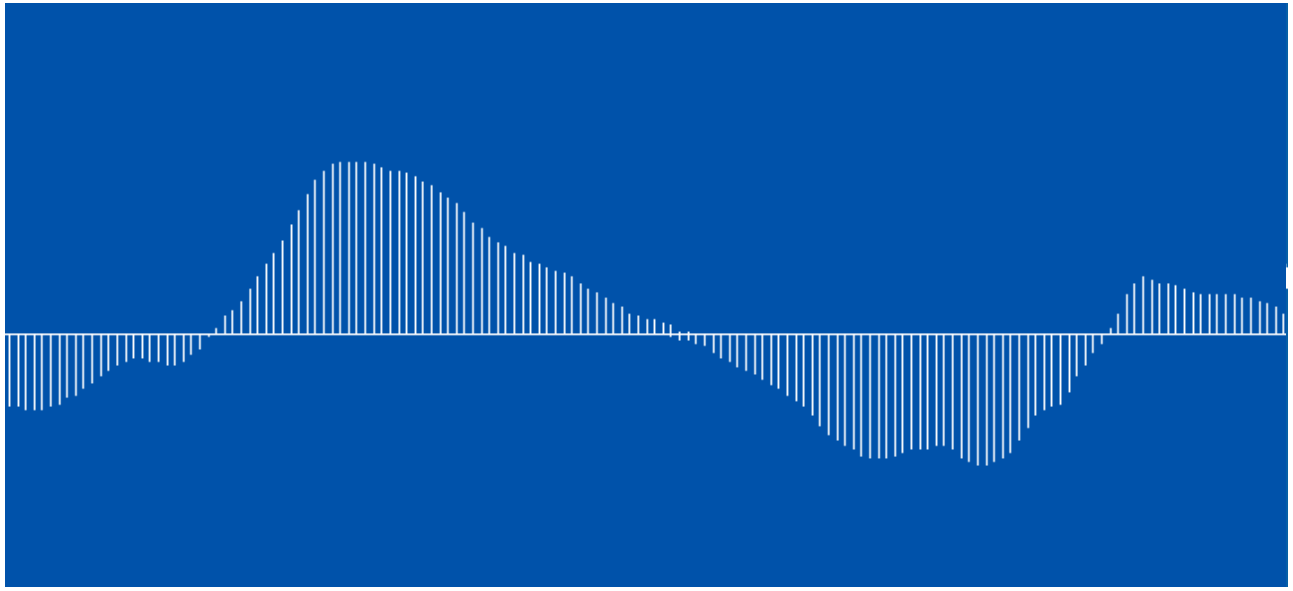

57
133
192

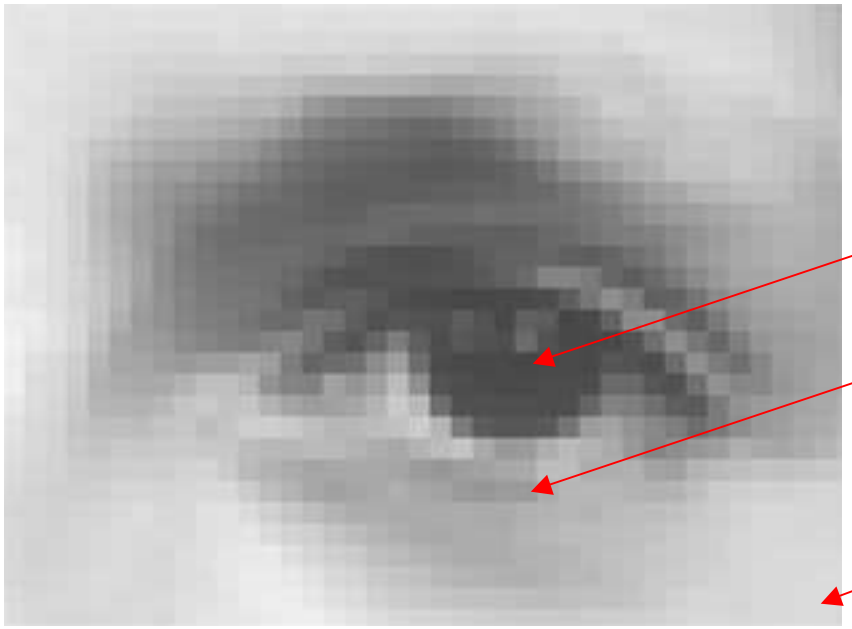

57
133
192

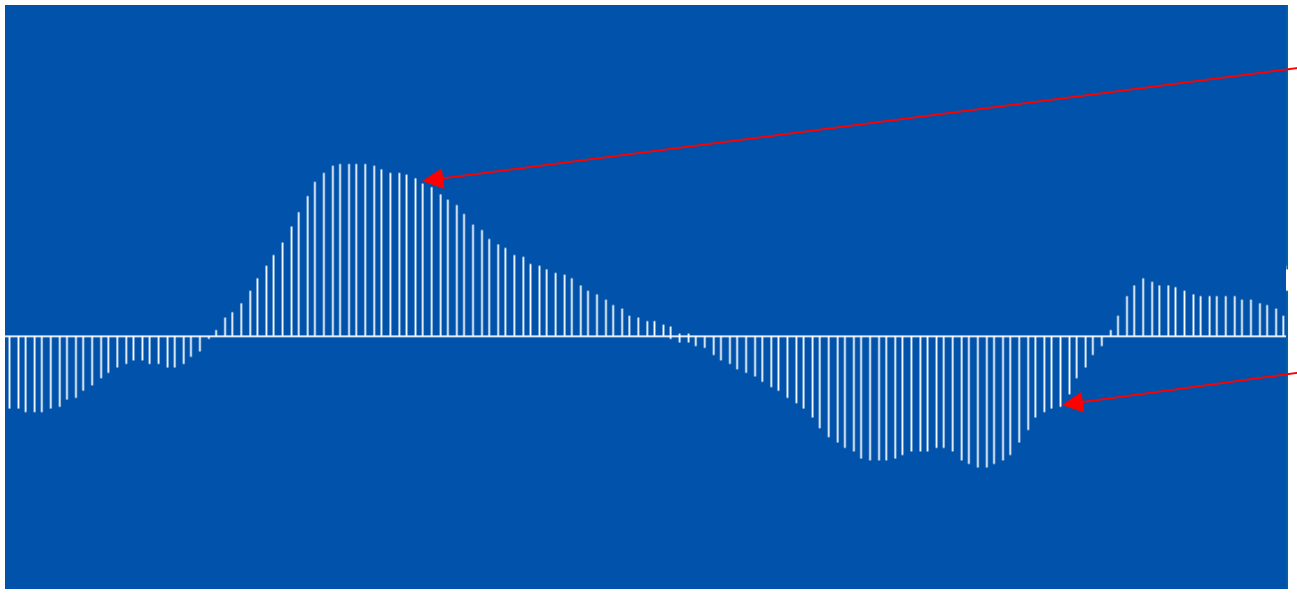

57
133
192




57
133
192




57
133
192


14427
-7322

Transporter et transformer l'information

- Algorithmes génériques

  copier à l'infini sans aucune modification

  stocker, diffuser, comprimer, crypter, etc.

- Algorithmes spécifiques

  textes: recherche, correction, traduction (?)

  sons, images: compression, amélioration

  forces: mesures, contrôle

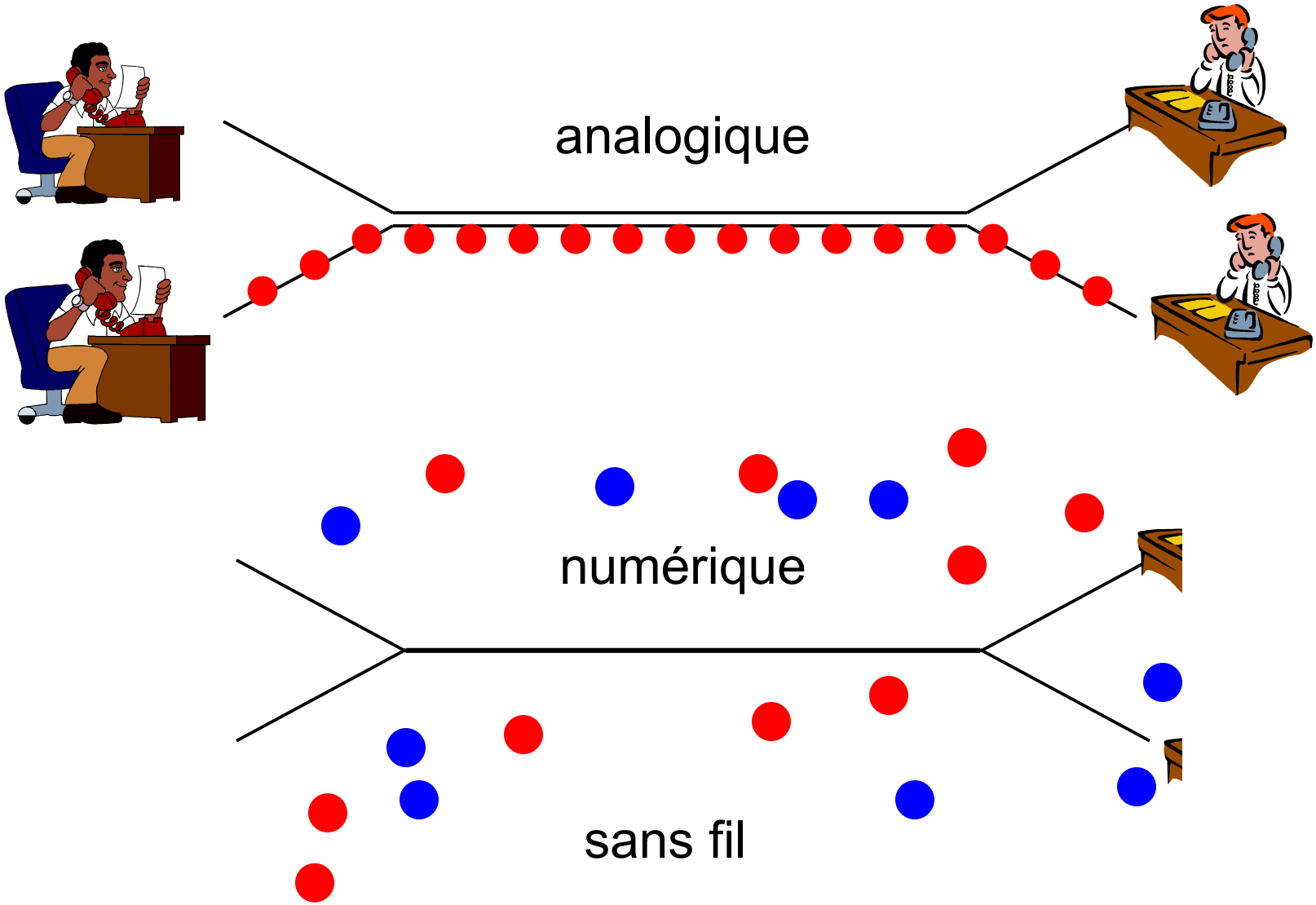
  ...

Al Khuwārizmī
~ 783 - 850

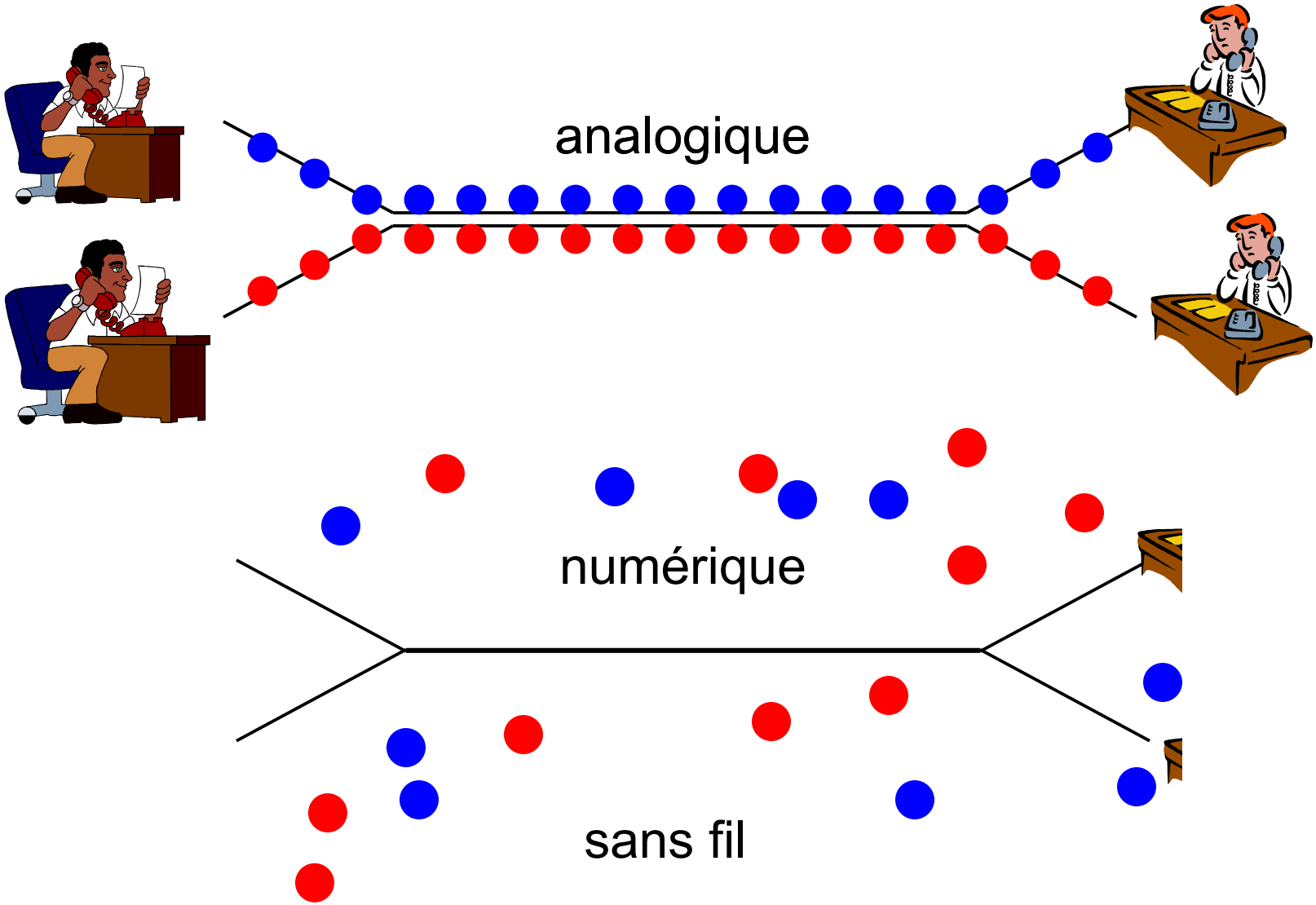
algorithme
algèbre

Source Jean Vuillemin

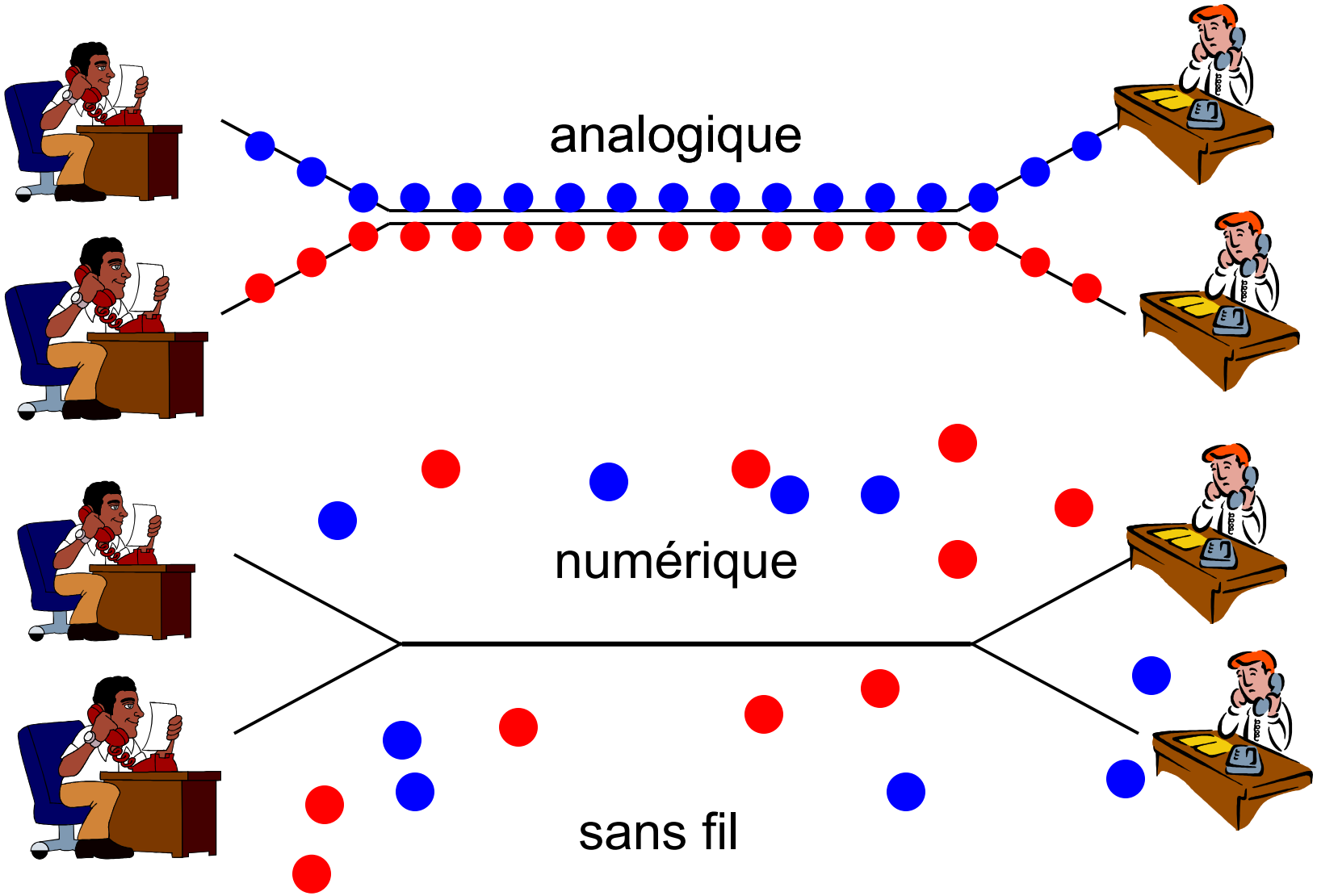
La téléphonie numérique



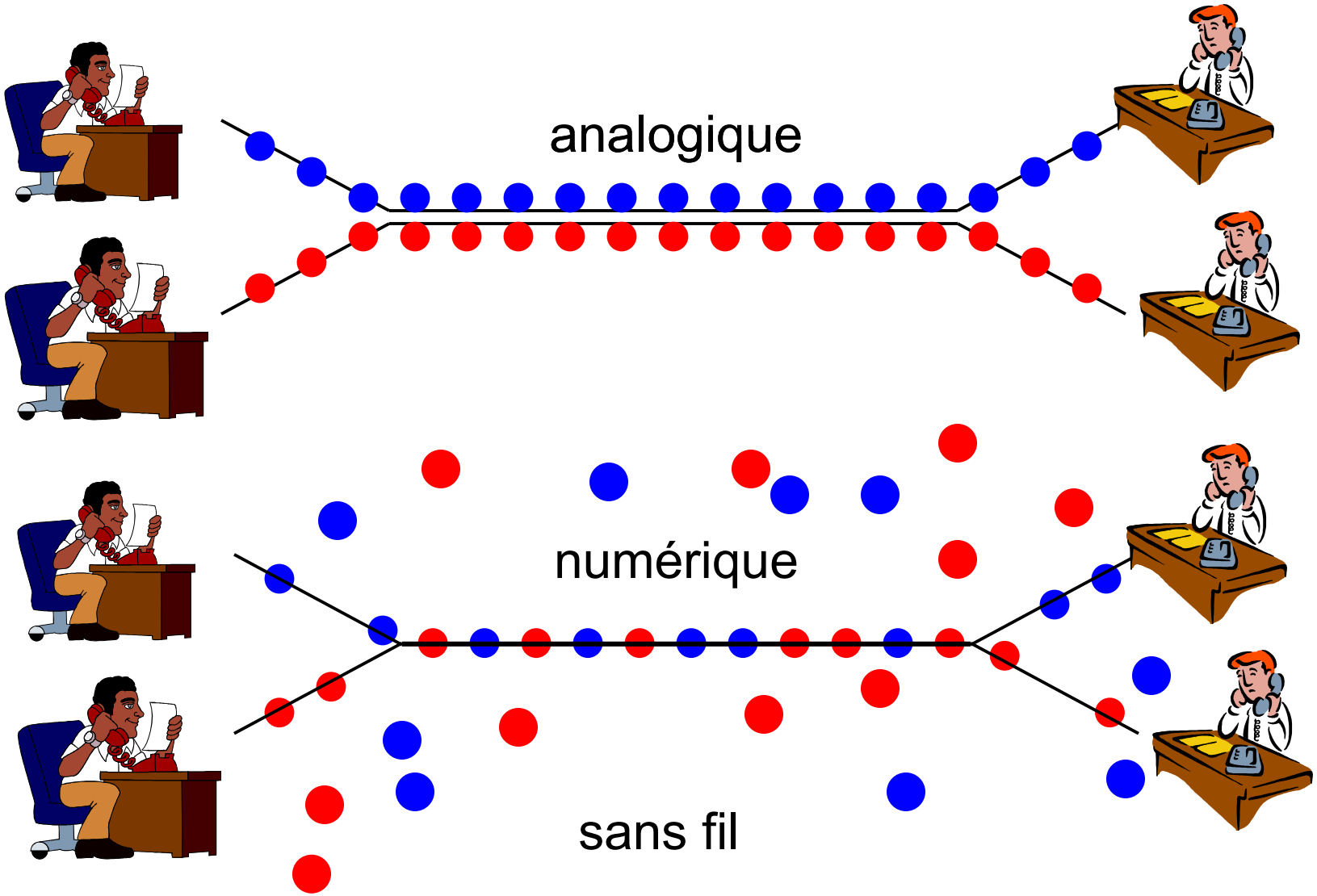
La téléphonie numérique



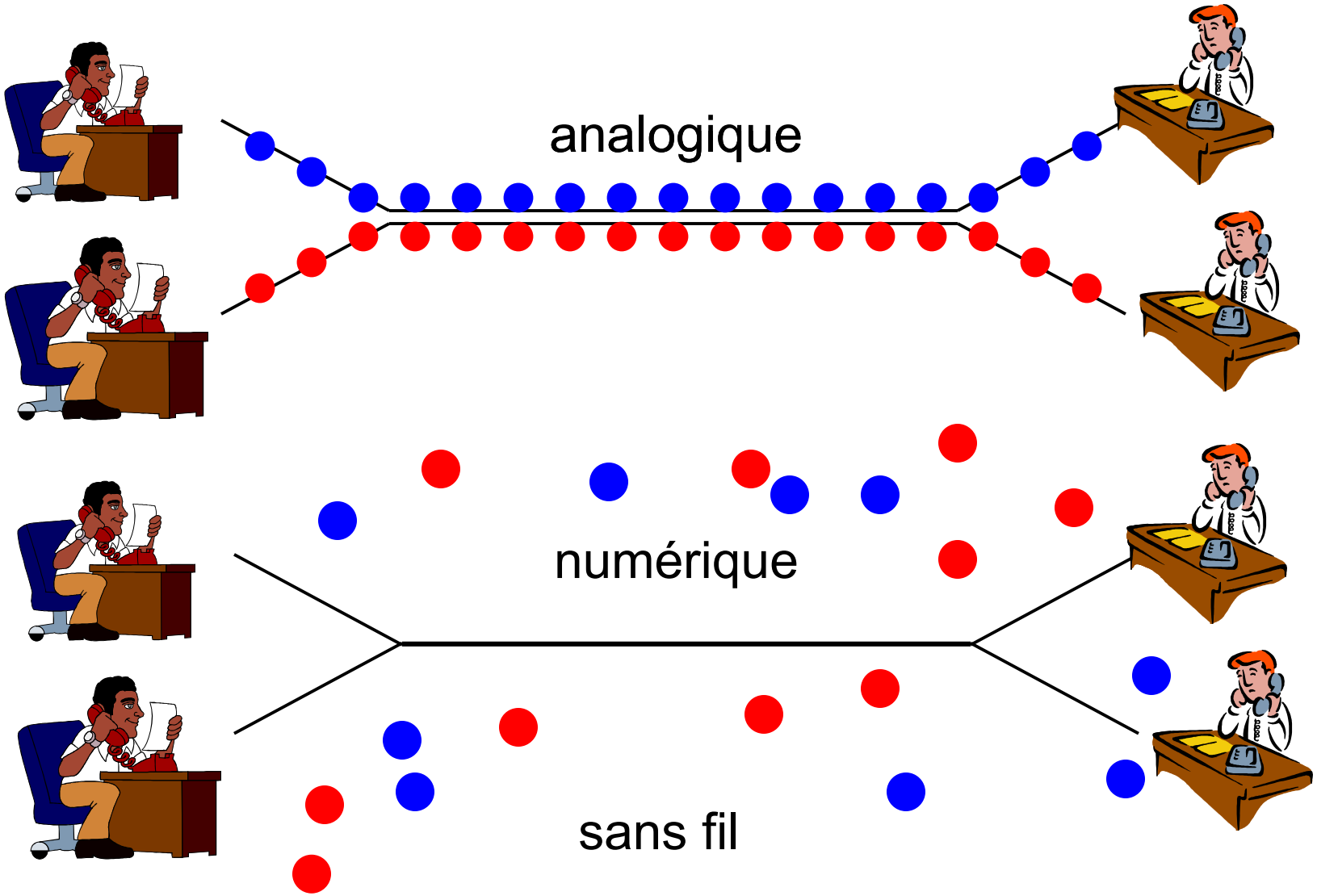
La téléphonie numérique



La téléphonie numérique



La téléphonie numérique



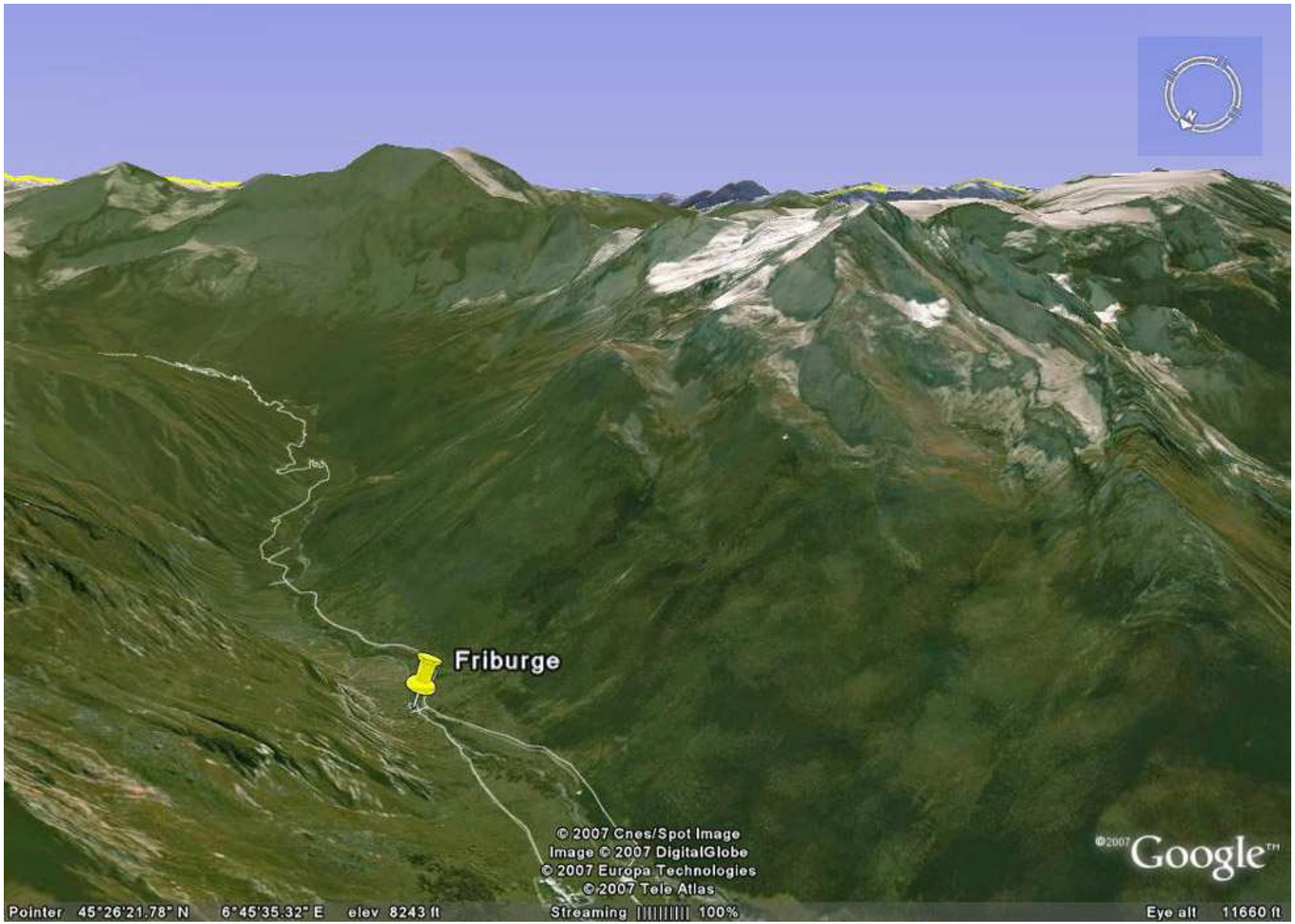
La photographie numérique

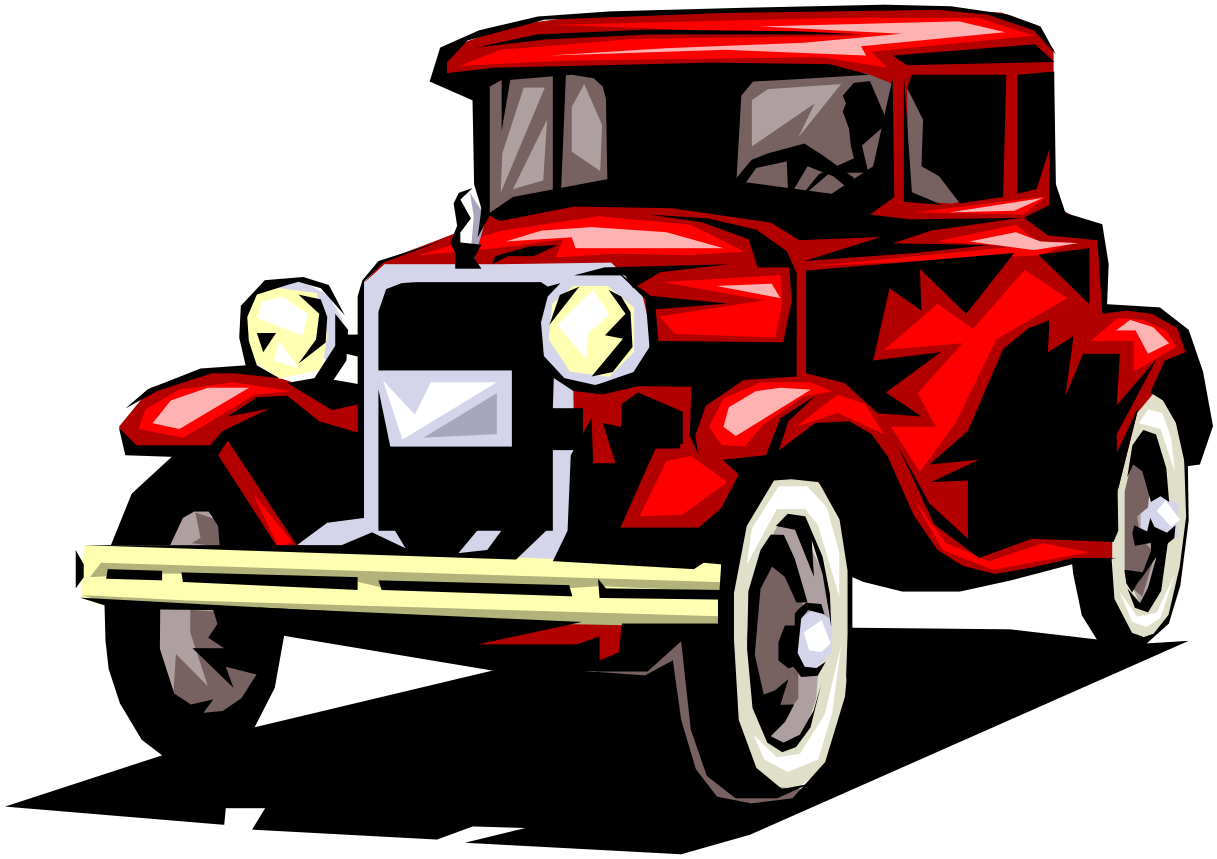
Source DxO Labs

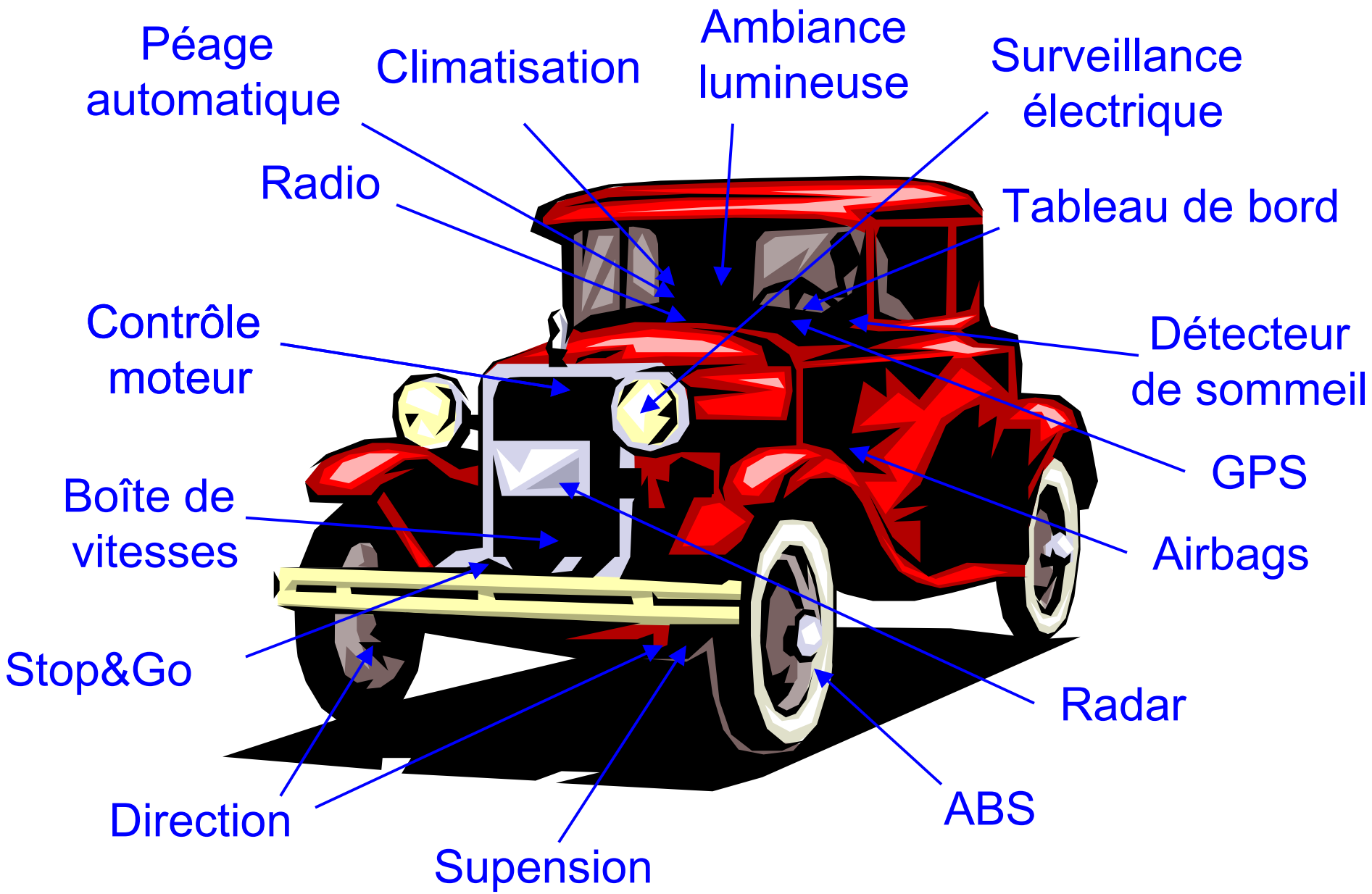
...une révolution, pas une substitution!

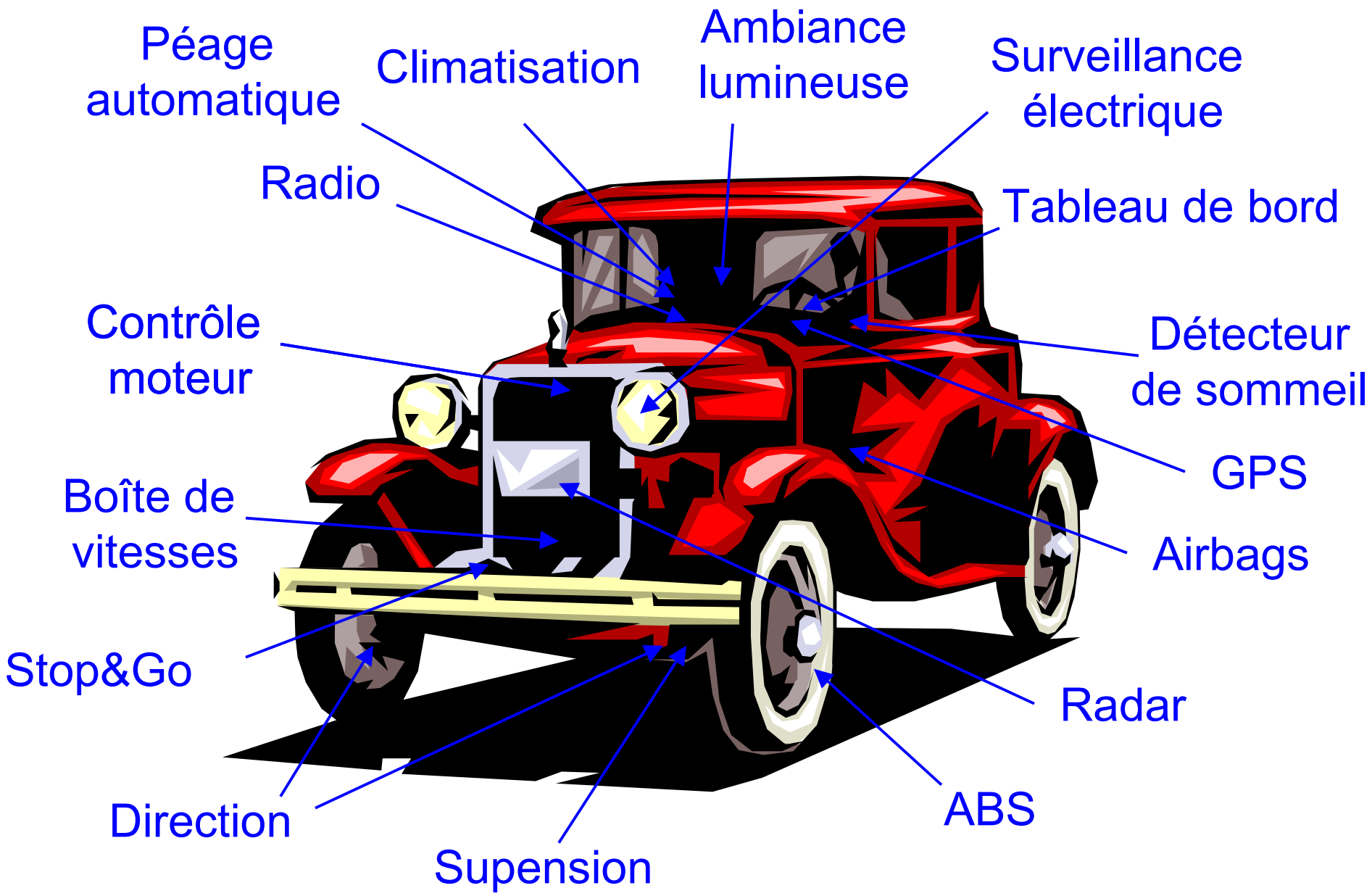
Source DxO Labs

La cartographie numérique






Péage automatique
Climatisation
Ambiance lumineuse
Surveillance électrique
Radio
Tableau de bord
Contrôle moteur
Détecteur de sommeil
GPS
Boîte de vitesses
Airbags
Stop&Go
Radar
Direction
Supension
ABS



Coordination avec la route et les autres voitures

La machine à information

La machine à information

1. Le matériel

   circuits, disques, réseaux, capteurs

La machine à information

1. Le matériel

   circuits, disques, réseaux, capteurs

2. Le logiciel

   infrastructure ou applicatif

La machine à information

1. Le matériel

   circuits, disques, réseaux, capteurs

2. Le logiciel

   infrastructure ou applicatif

3. L'interface homme-machine

   souvent un point de faiblesse

La machine à information

1. Le matériel

   circuits, disques, réseaux, capteurs

2. Le logiciel

   infrastructure ou applicatif

3. L'interface homme-machine

   souvent un point de faiblesse

4. Les bugs

   une malencontreuse spécificité !

La machine à information

1. Le matériel

   circuits, disques, réseaux, capteurs

2. Le logiciel

   infrastructure ou applicatif

3. L'interface homme-machine

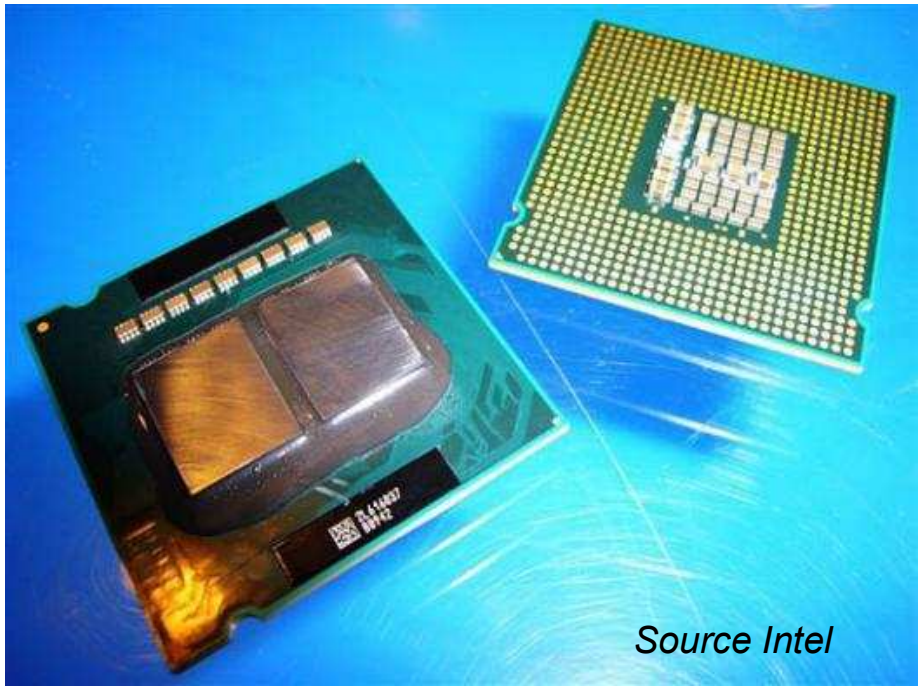
   souvent un point de faiblesse

4. Les bugs

   une malencontreuse spécificité !

Pour réaliser une logique fondamentalement invisible

Les circuits

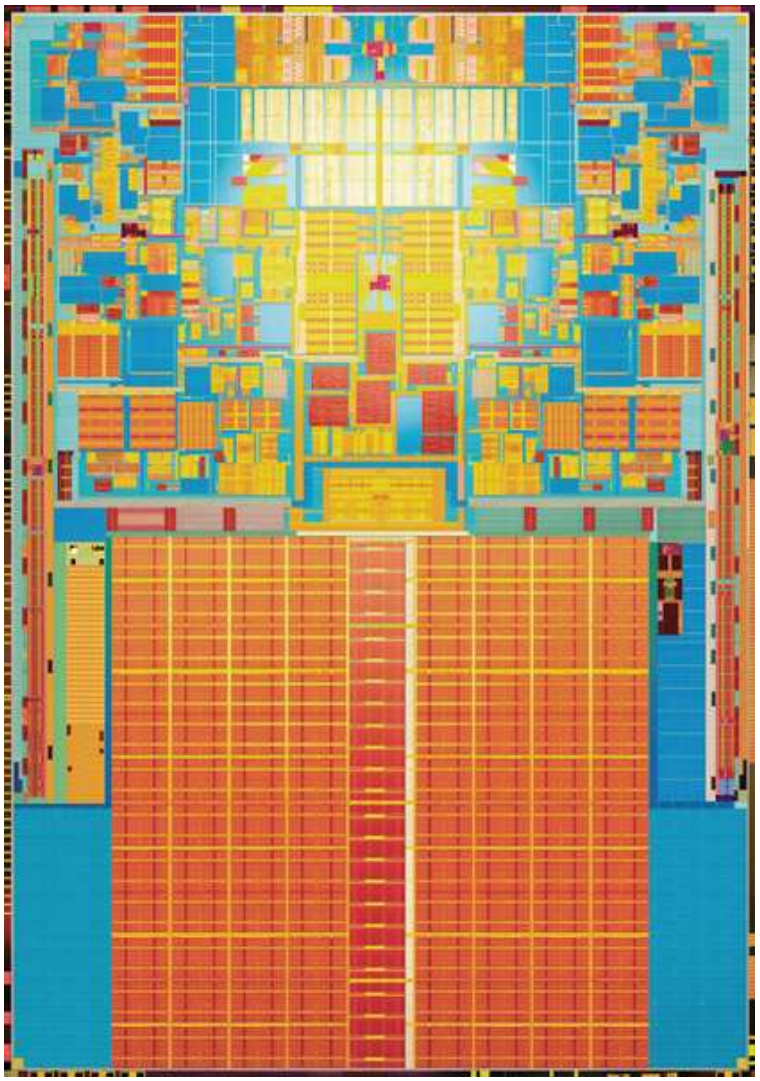


Source Intel

SoC = System on Chip

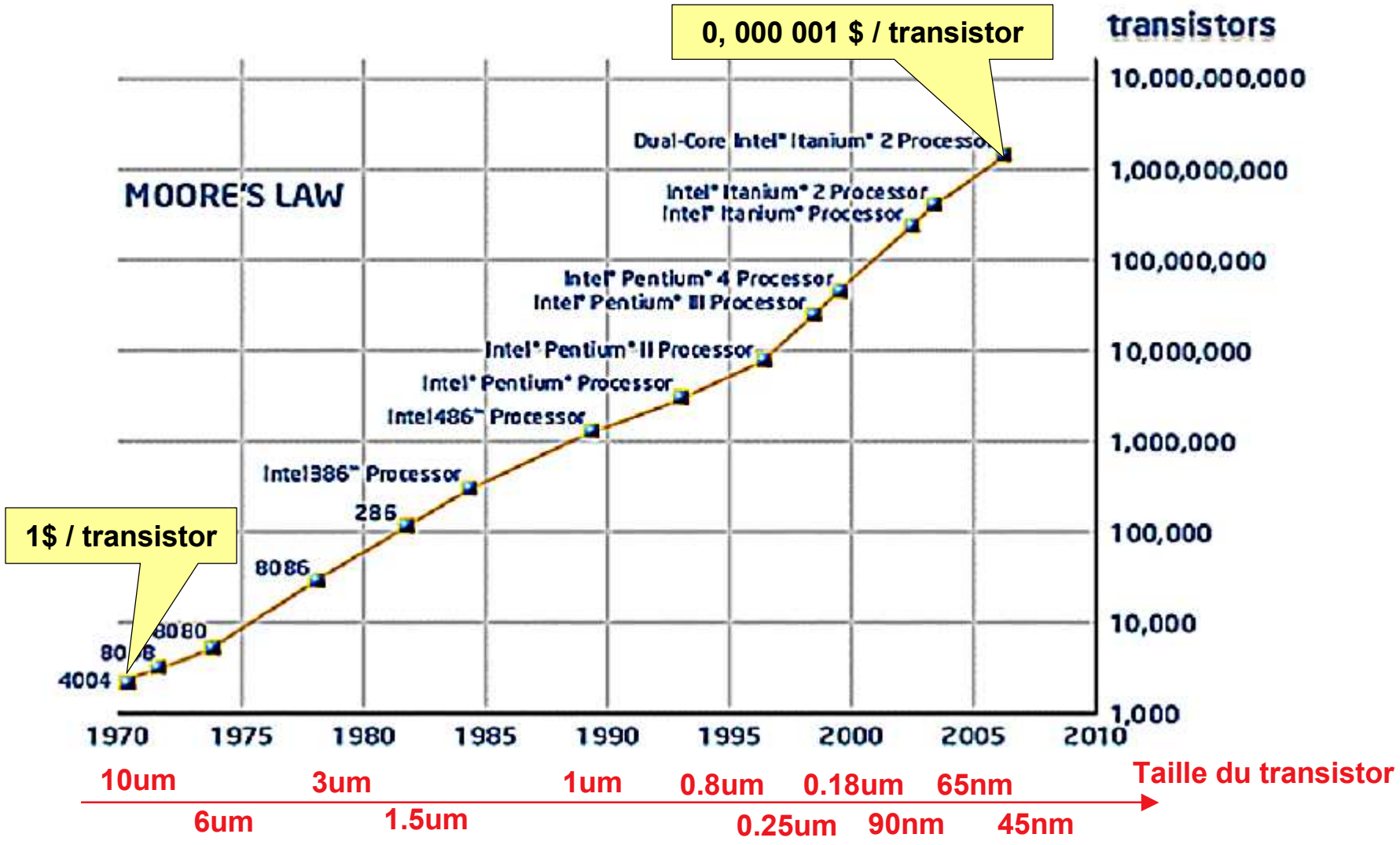
microprocesseurs de PC

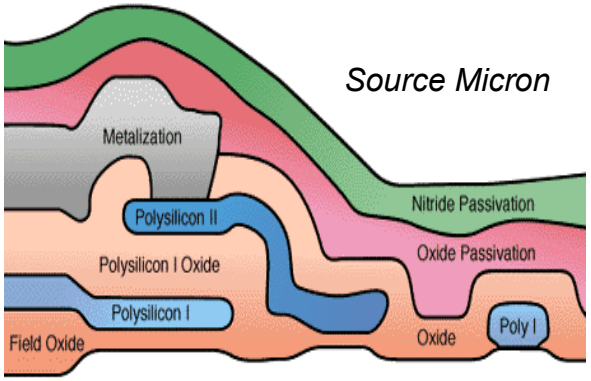
téléphones, DVD, TV, GPS



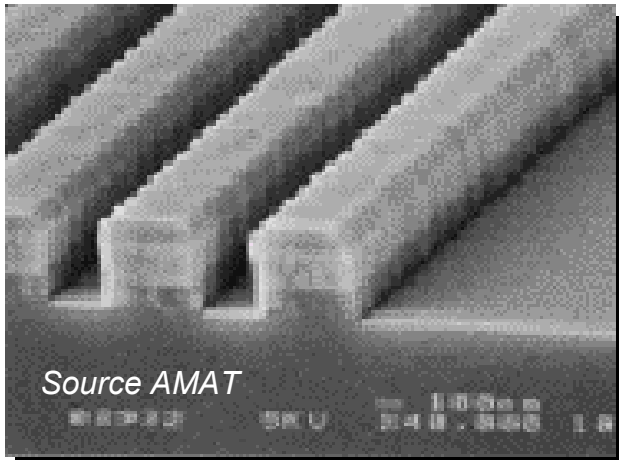
Source Intel

La loi de Moore

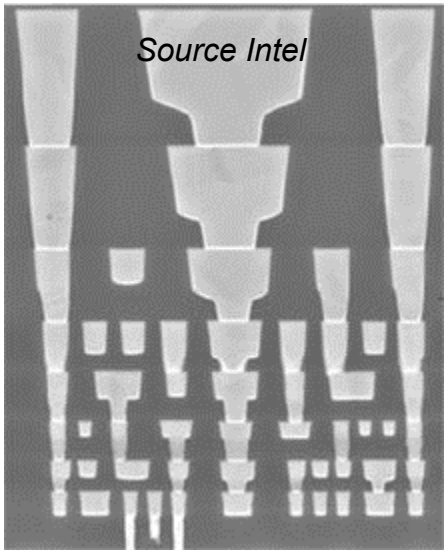




Source Micron

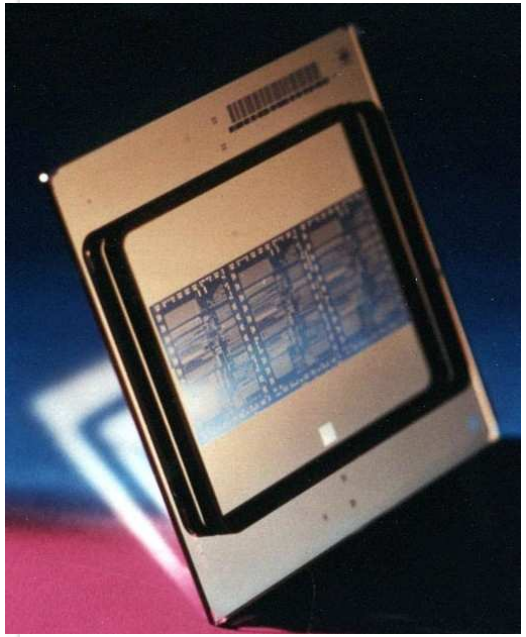


Source AMAT



Source Intel

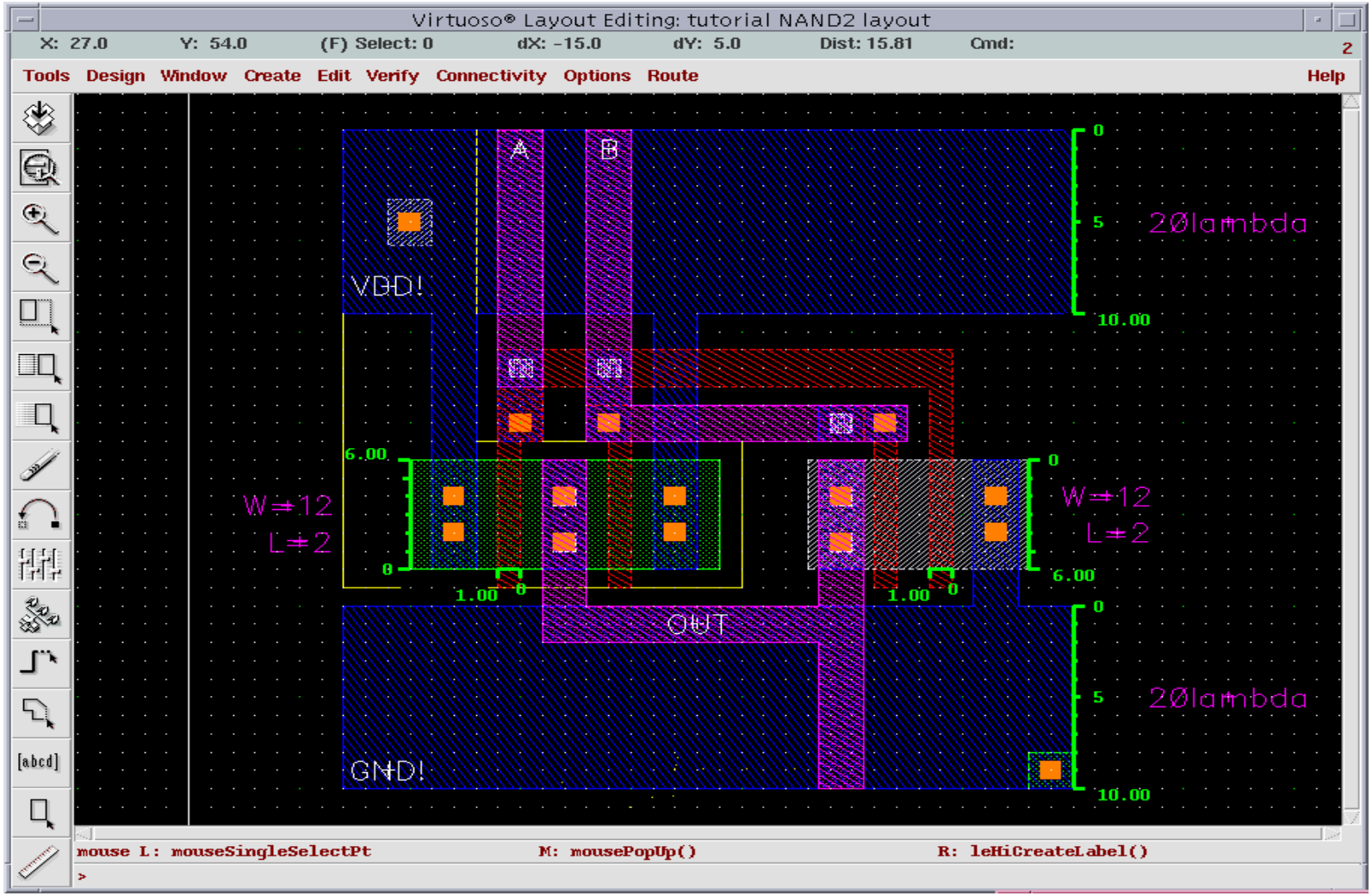
Source ASML



Source Photronics : réticule

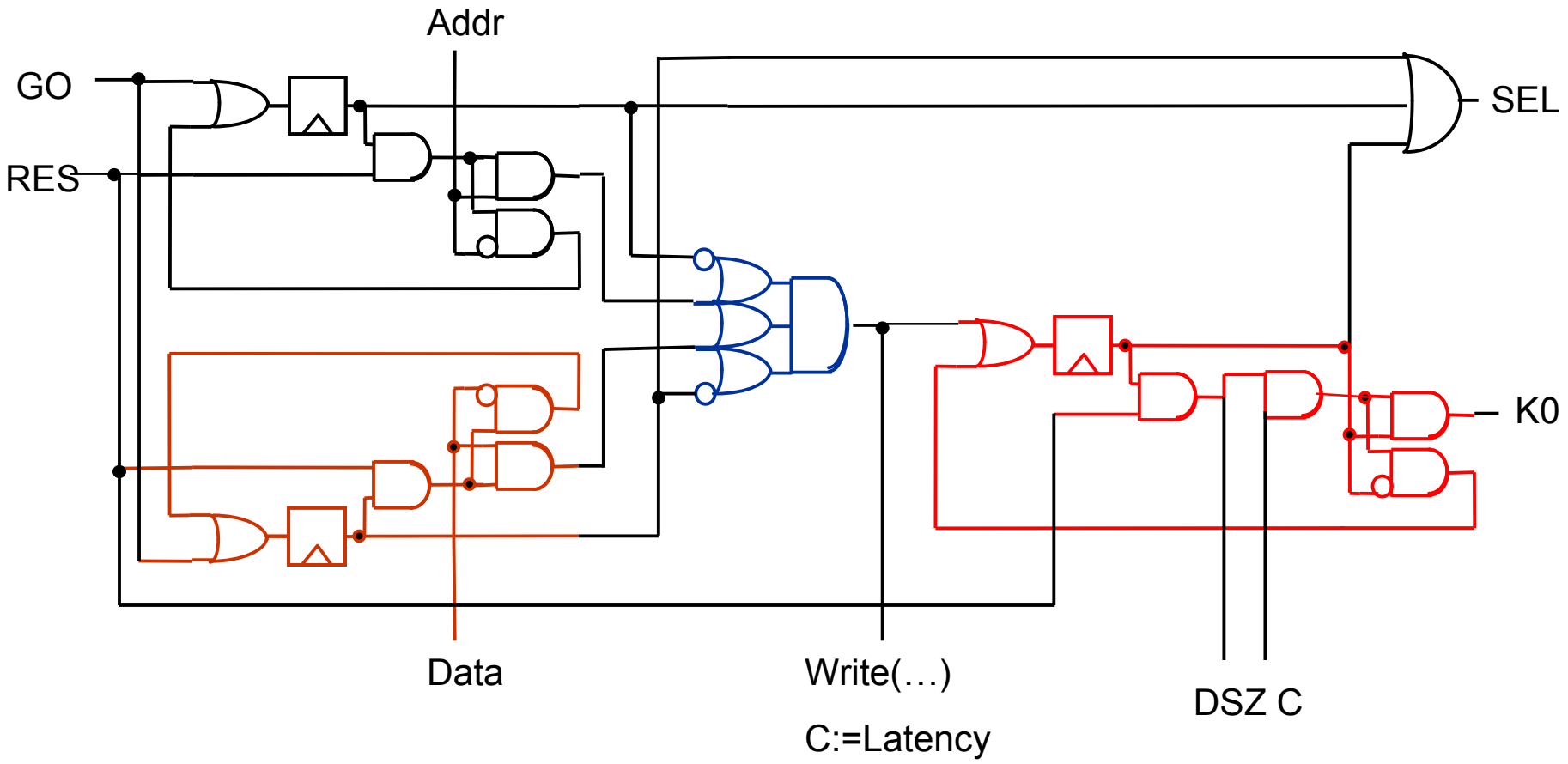
Source ASML

Une porte de base (NAND)

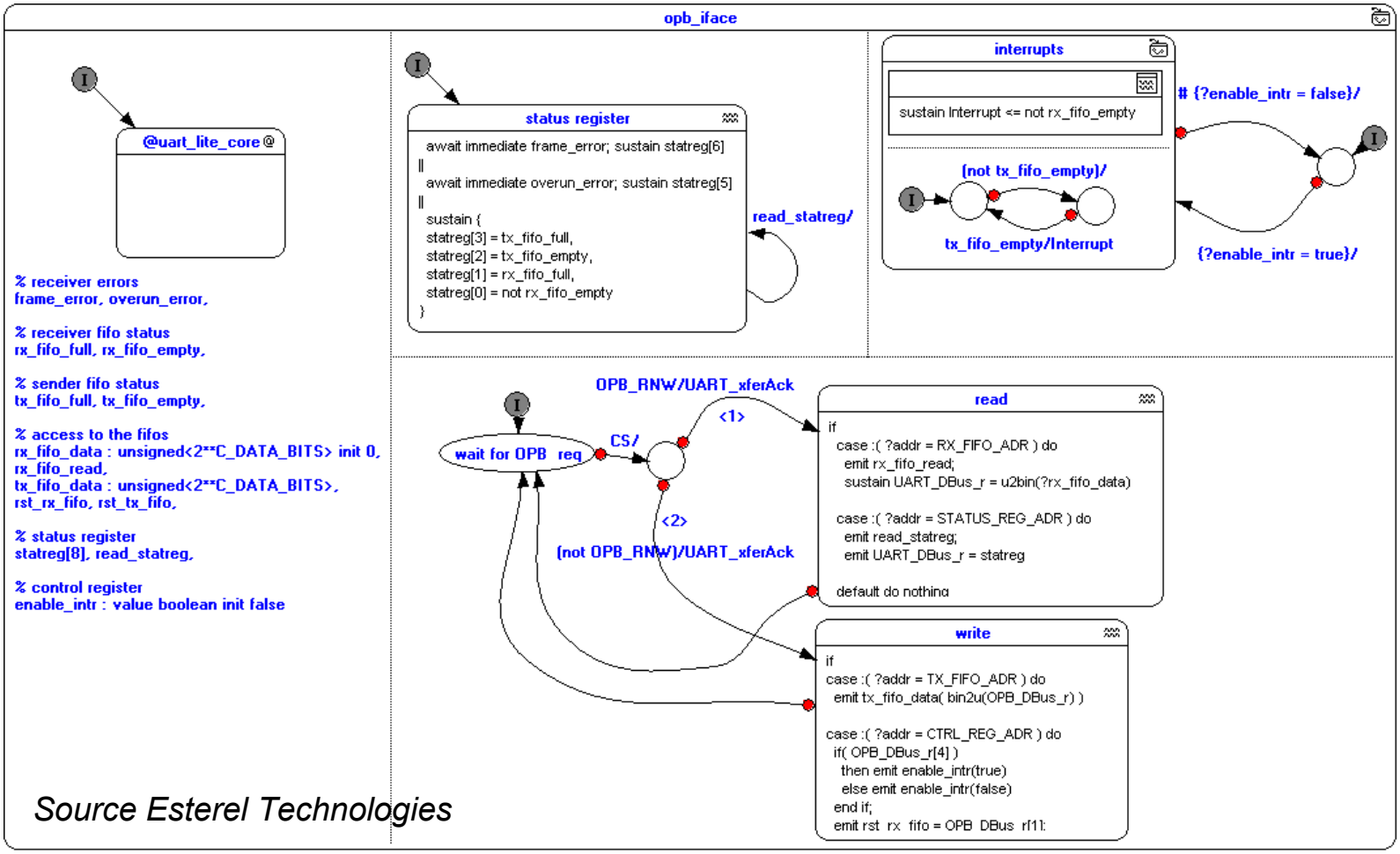


Source Cadence Design Systems

Niveau logique 0/1



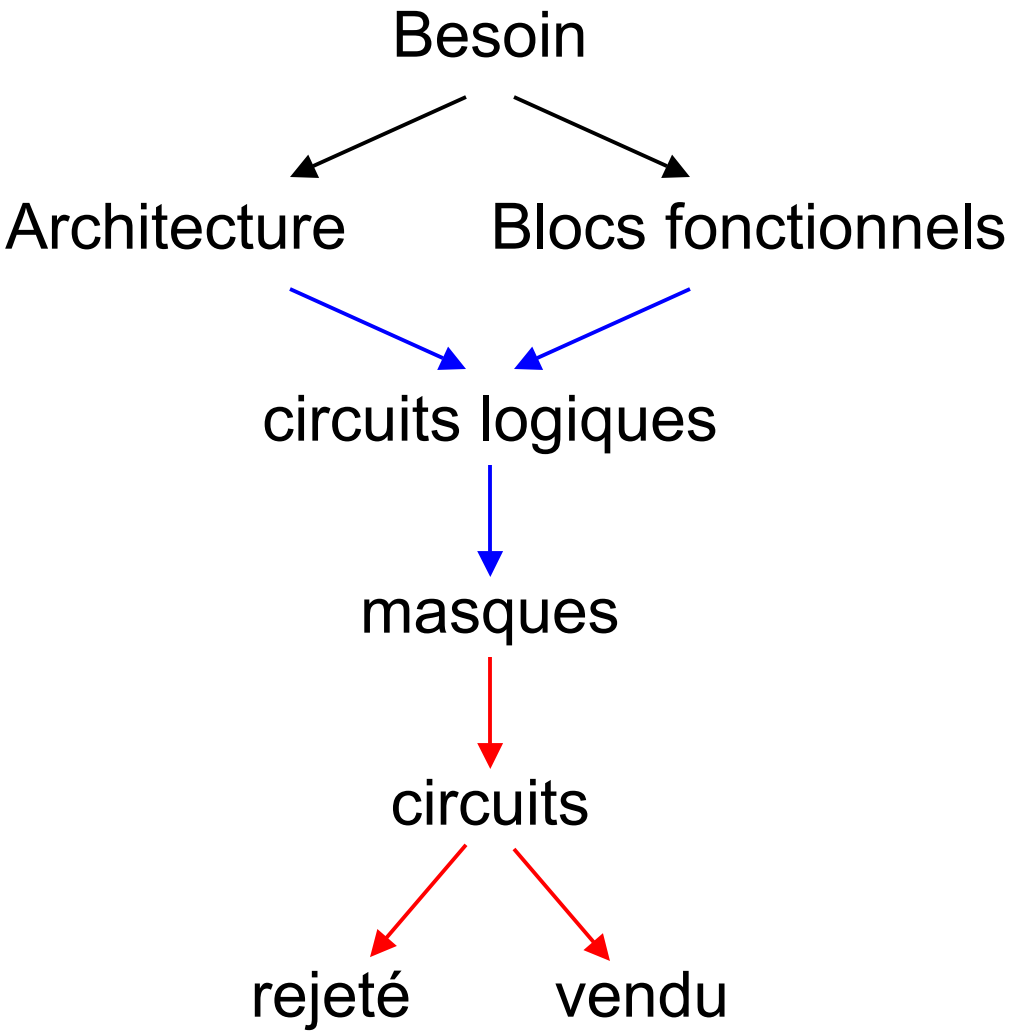
Haut niveau : Esterel v7



Source Esterel Technologies

Texte + graphique, définition mathématique

La chaîne des niveaux d'abstraction

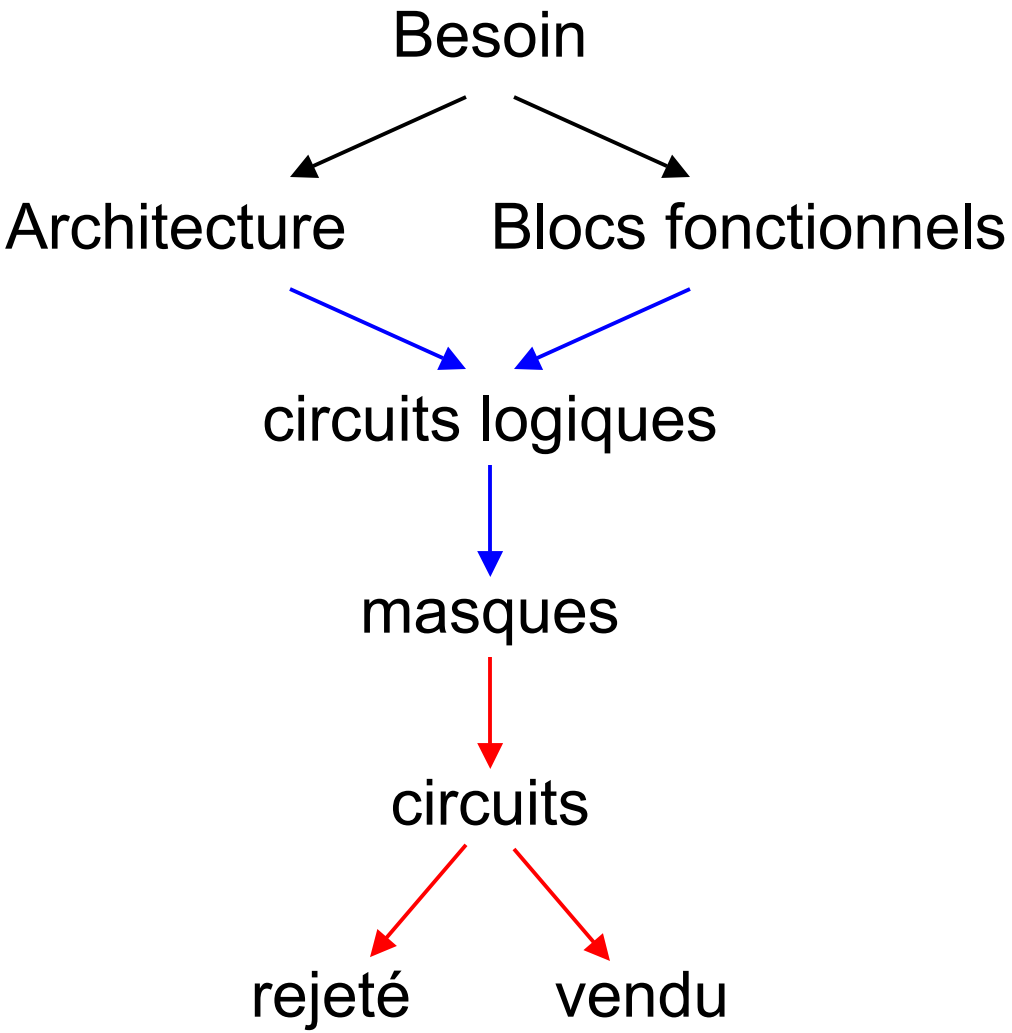


$$

$$$$

$$$$$$$$$

La chaîne des niveaux d'abstraction



$$

$$$$

$$$$$$$$$

Objet léger, mais industrie lourde !

L' avenir des circuits

- La réduction de taille peut continuer
  - le problème actuel est la puissance dissipée
- Mais c'est l'économie qui pourrait flancher !
  - progression concommitante du coût des usines (> 2Md$)
  - et du coût de conception des puces (X*1000 hommes-an)
  - conçues à partir de composants hétérogènes

    mais faites en une fois et pas réparables
  - et rentables seulement en très grand volume

L' avenir des circuits

- La réduction de taille peut continuer
  - le problème actuel est la puissance dissipée
- Mais c'est l'économie qui pourrait flancher !
  - progression concommitante du coût des usines (> 2Md$)
  - et du coût de conception des puces (X*1000 hommes-an)
  - conçues à partir de composants hétérogènes

    mais faites en une fois et pas réparables
  - et rentables seulement en très grand volume

Aussi complexe qu'un avion

Le logiciel

Un circuit ne fait que des choses très simples

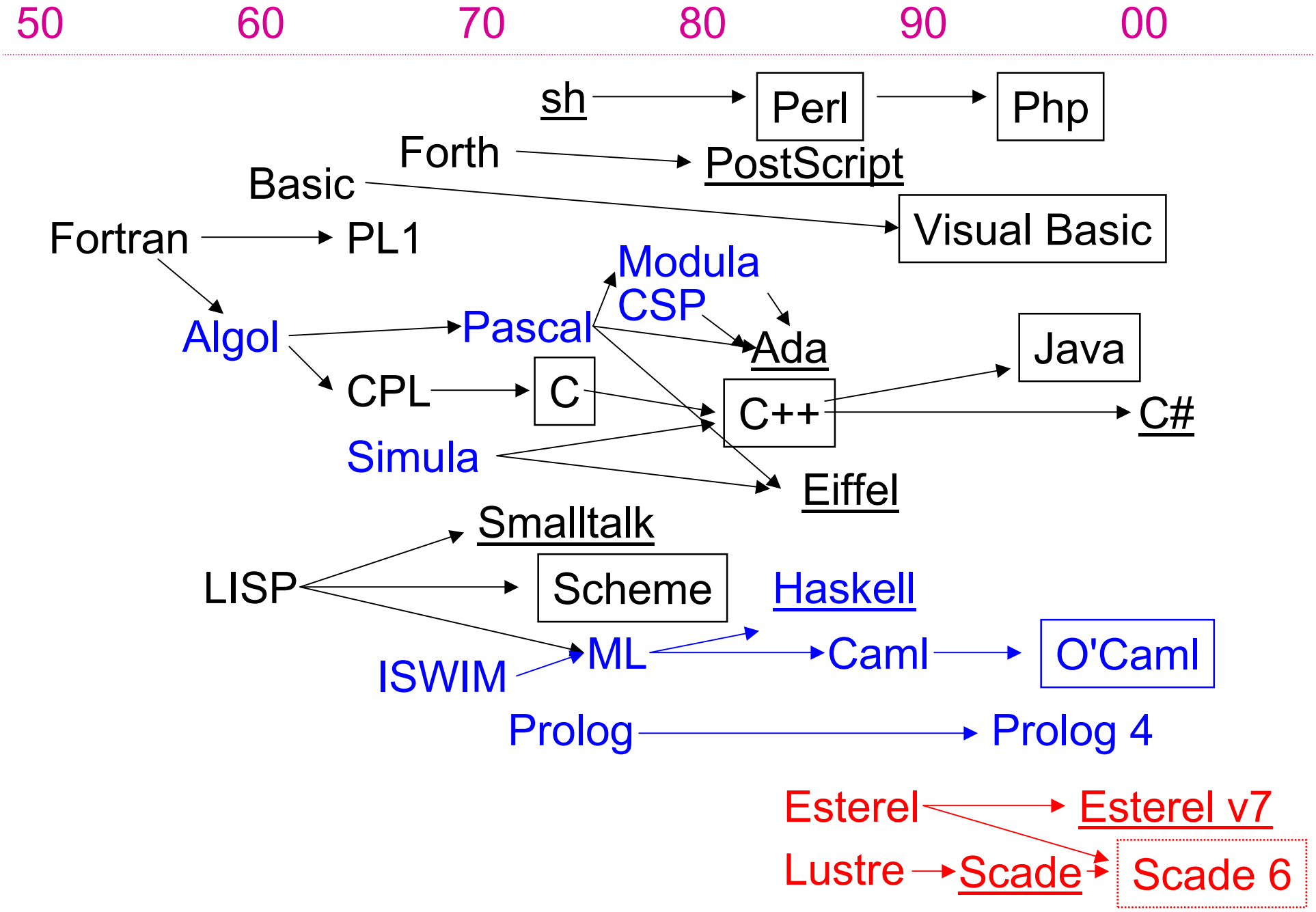
Il en fait des milliards par seconde, et sans erreur

Le logiciel : spécifier quoi faire, dans tous les détails

Le logiciel

Un circuit ne fait que des choses très simples
Il en fait des milliards par seconde, et sans erreur
Le logiciel : spécifier quoi faire, dans tous les détails

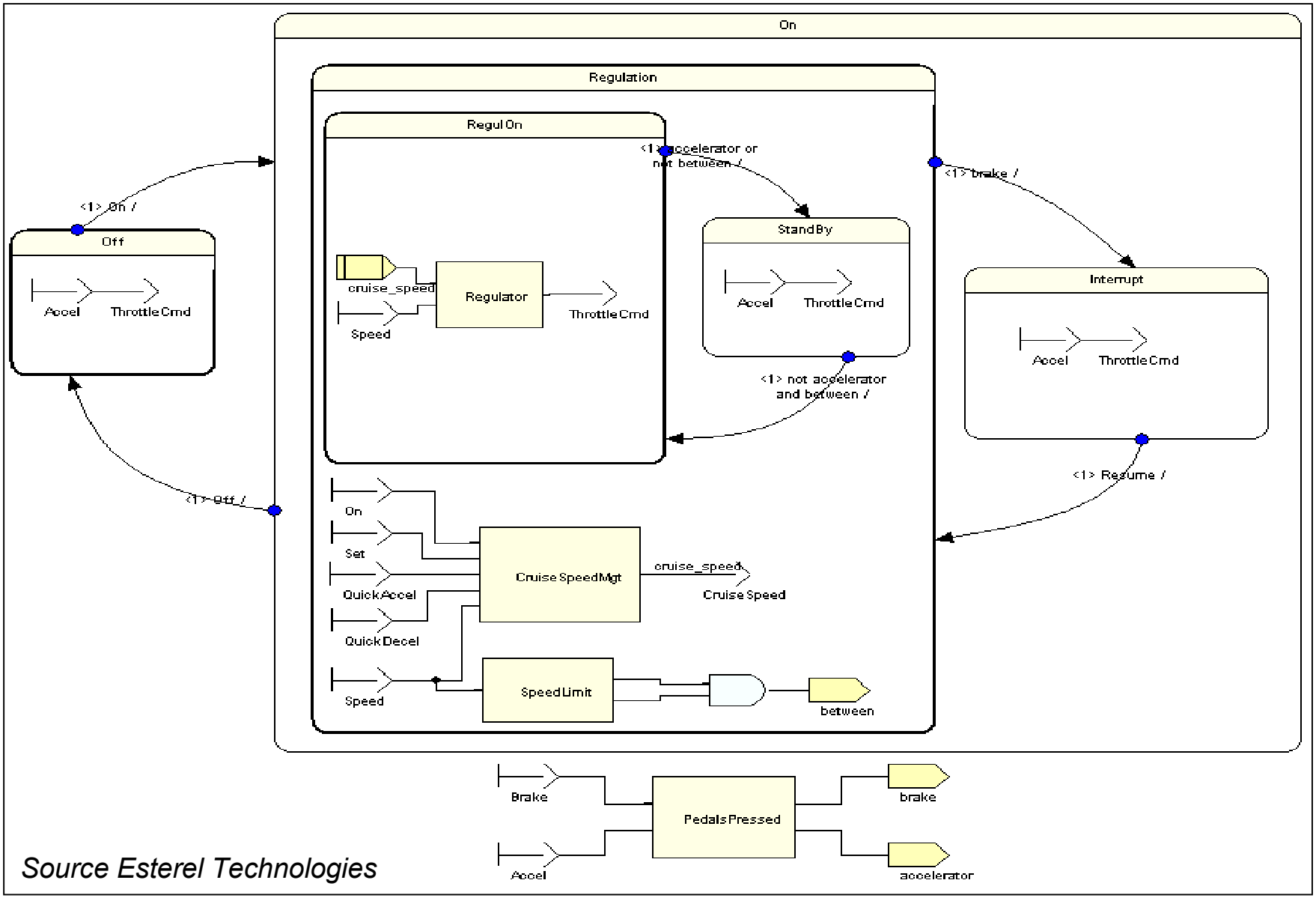
- Très long texte dans un langage très technique
- Circuits peu variés, logiciels très variés
- Circuits très rigides, logiciels très souples
- Mais de plus en plus gros (millions de lignes)
- Et pas de loi de Moore....


50
60
70
80
90
00
sh
Perl
Php
Forth
PostScript
Basic
Visual Basic
Fortran
PL1
Modula
CSP
Algol
Pascal
Ada
Java
CPL
C
C++
C#
Simula
Eiffel
Smalltalk
LISP
Scheme
Haskell
ML
Caml
O'Caml
ISWIM
Prolog
Prolog 4
Esterel
Esterel v7
Lustre
Scade
Scade 6

```
const bool SimpleSignal::CheckEmitterOk (const NetInfo& sourceNetInfo) const {
  const Module& module = GetModule();
  if (! IsClock()) {
    return true;
  }
  // signal is a clock, no problem if no emitter so far
  OrGate& sigcurOrGate = sigcur_or_gate_set.GetGate(IncarnIndex());
  if (sigcurOrGate.GetPFirstFaninGateCell() == NULL) {
    return true;
  } else {
    // two emissions, reject
    // fetch current emitter statement
    if (!sourceNetInfo.IsStatementNetInfo()) {
      StnInternalError("bad netinfo for statement gate");
    }
    const StatementNetInfo& statementNetInfo =
      static_cast<const StatementNetInfo&>(sourceNetInfo);
    const Statement& statement = statementNetInfo.GetStatement();
    // fetch previous emitter statement
    const Gate& prevSourceGate =
      sigcurOrGate.GetPFirstFaninGateCell()->GetConnection().GetSourceGate();
    const NetInfo& prevSourceNetInfo = prevSourceGate.GetNetInfo();
    if (!prevSourceNetInfo.IsStatementNetInfo()) {
      StnInternalError("bad netinfo for statement gate");
    }
    const StatementNetInfo& prevStatementNetInfo =
      static_cast<const StatementNetInfo&>(prevSourceNetInfo);
    const Statement& prevStatement = prevStatementNetInfo.GetStatement();
    const char* errMess ="clock defined twice";
    StnErrorWithTwoPragmaLists(errMess,
                               prevStatement.GetPragmaList(),
                               statement.GetPragmaList(),
                               module);
    GenerationError = true;
    return false;
  }
}
```

```
const bool SimpleSignal::CheckEmitterOk (const NetInfo& sourceNetInfo) const {
  const Module& module = GetModule();
  if (! IsClock()) {
    return true;
  }
  // signal is a clock, no problem if no emitter so far
  OrGate& sigcurOrGate = sigcur_or_gate_set.GetGate(IncarnIndex());
  if (sigcurOrGate.GetPFirstFaninGateCell() == NULL) {
    return true;
  } else {
    // two emissions, reject
    // fetch current emitter statement
    if (!sourceNetInfo.IsStatementNetInfo()) {
      StnInternalError("bad netinfo for statement gate");
    }
    const StatementNetInfo& statementNetInfo =
      static_cast<const StatementNetInfo&>(sourceNetInfo);
    const Statement& statement = statementNetInfo.GetStatement();
    // fetch previous emitter statement
    const Gate& prevSourceGate =
      sigcurOrGate.GetPFirstFaninGateCell()->GetConnection().GetSourceGate();
    const NetInfo& prevSourceNetInfo = prevSourceGate.GetNetInfo();
    if (!prevSourceNetInfo.IsStatementNetInfo()) {
      StnInternalError("bad netinfo for statement gate");
    }
    const StatementNetInfo& prevStatementNetInfo =
      static_cast<const StatementNetInfo&>(prevSourceNetInfo);
    const Statement& prevStatement = prevStatementNetInfo.GetStatement();
    const char* errMess ="clock defined twice";
    StnErrorWithTwoPragmaLists(errMess,
                               prevStatement.GetPragmaList(),
                               statement.GetPragmaList(),
                               module);
    GenerationError = true;
    return false;
  }
}
```

Scade 6 : avions, trains, voitures, etc.



Source Esterel Technologies

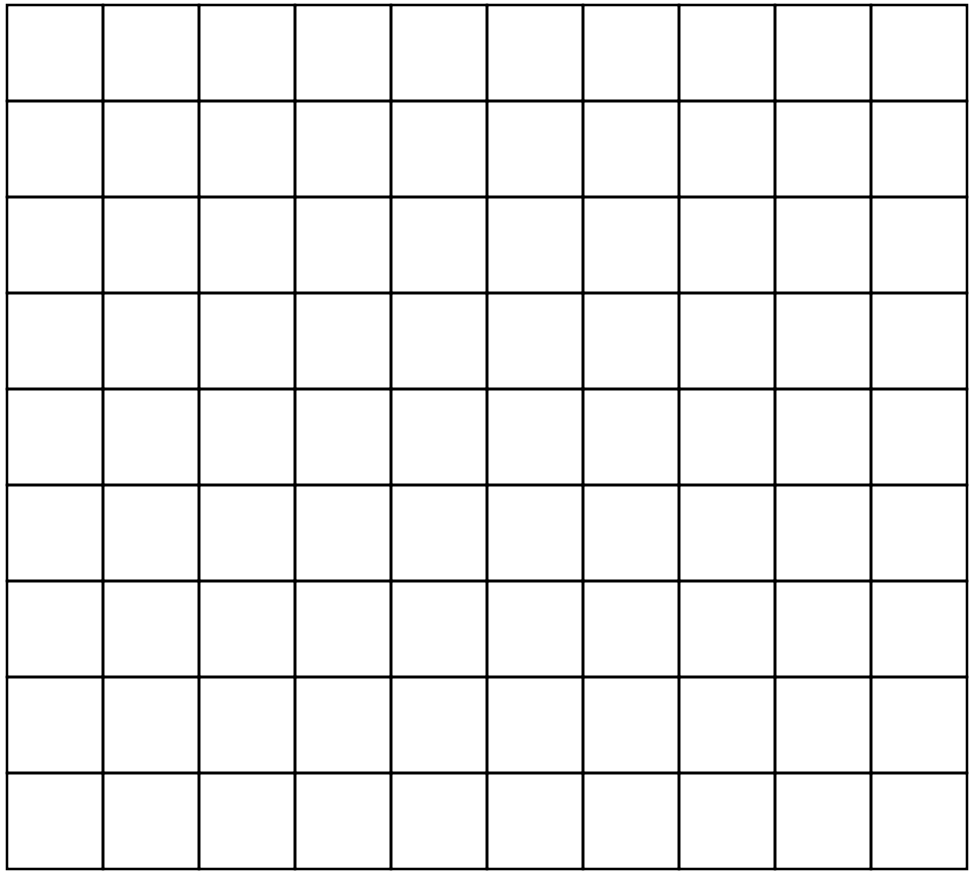
Le bug

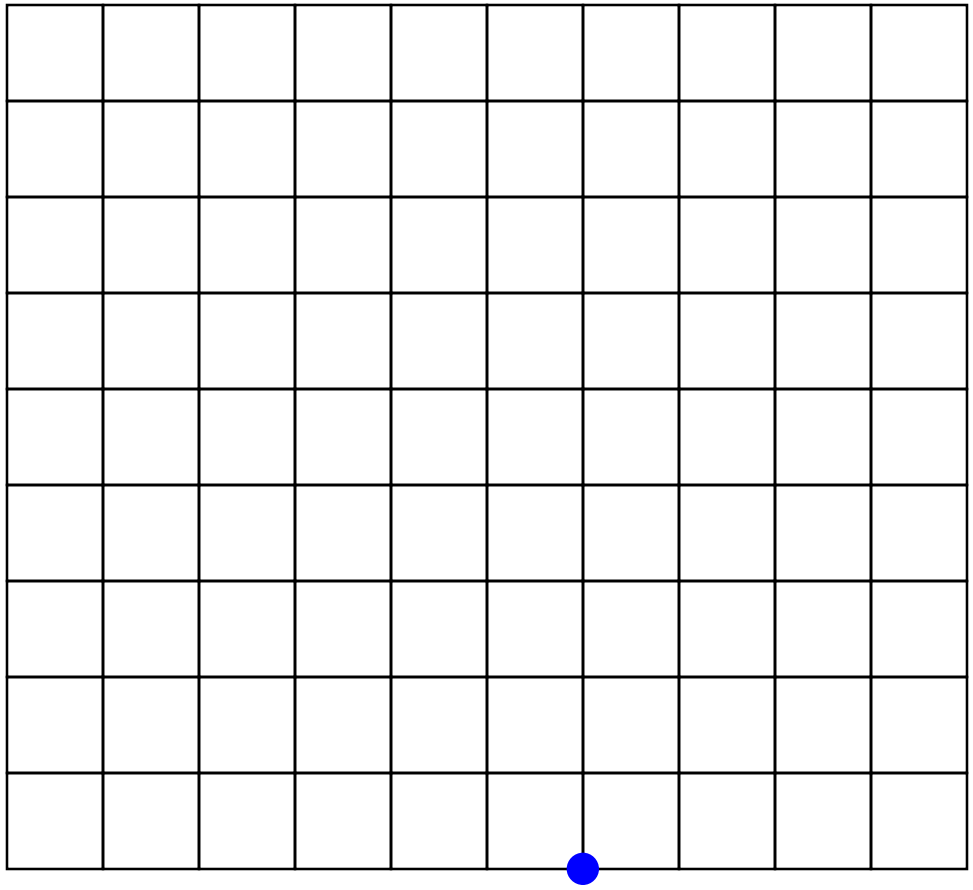
- Comportement anormal du système
- Pas une défaillance de la machine,
  mais défaillance du concepteur, i.e., mauvais ordre
- Coût annuel global: 100 milliards de dollars (DoC)

Le bug

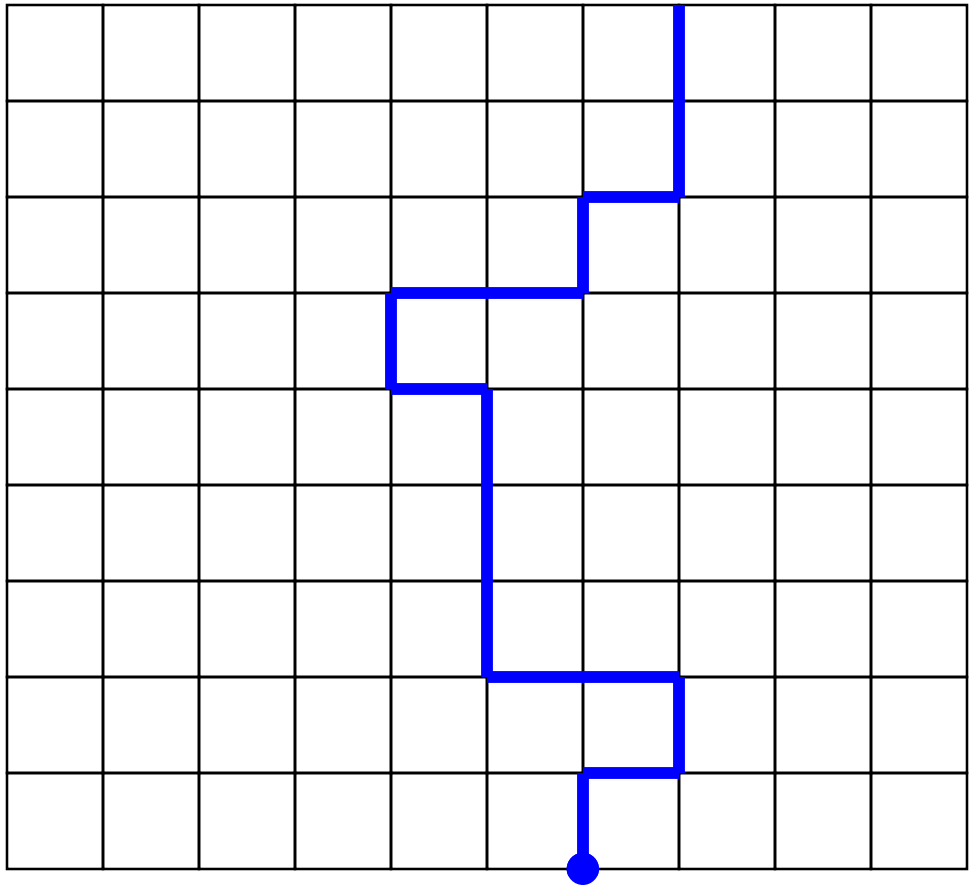
- Comportement anormal du système
- Pas une défaillance de la machine,
  mais défaillance du concepteur, i.e., mauvais ordre
- Coût annuel global: 100 milliards de dollars (DoC)

A petits bugs grandes conséquences!

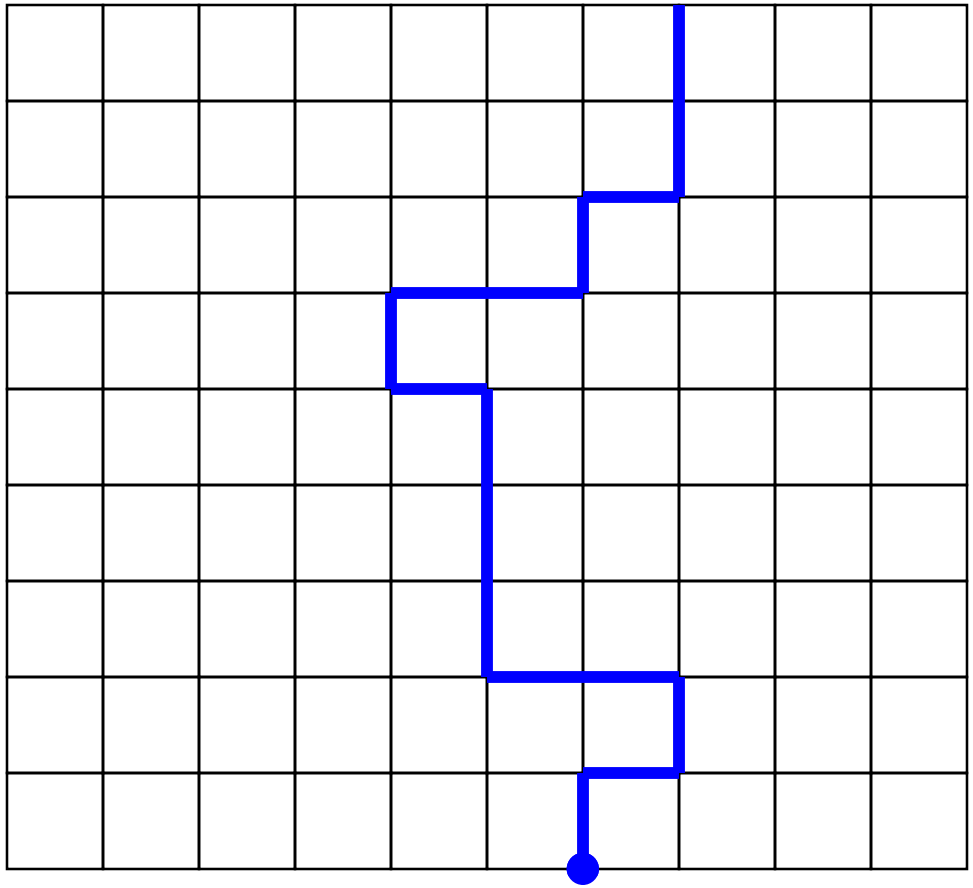




TDGGTDTTGDDTGDTGT

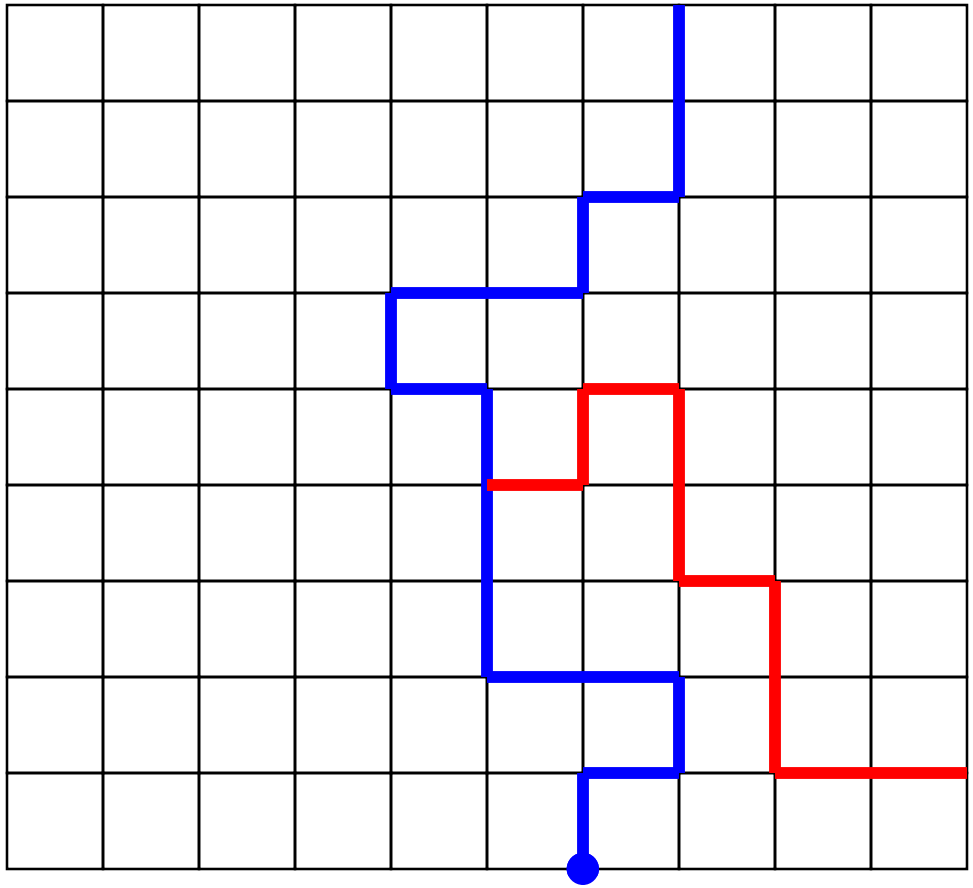


TDGGTDTTGDDTGDTGT



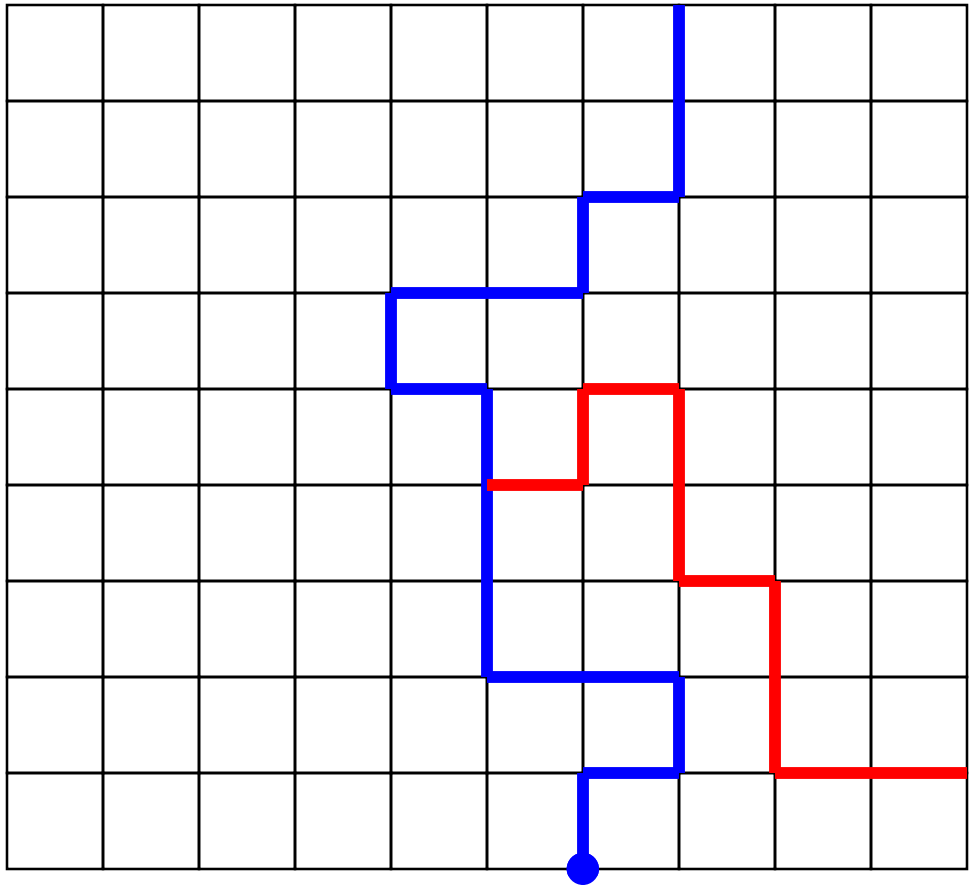
TDGGTDTTGDDTGDTGT

TDGGTDTDGDDTGDTGT



TDGGTDTTGDDTGDTGT

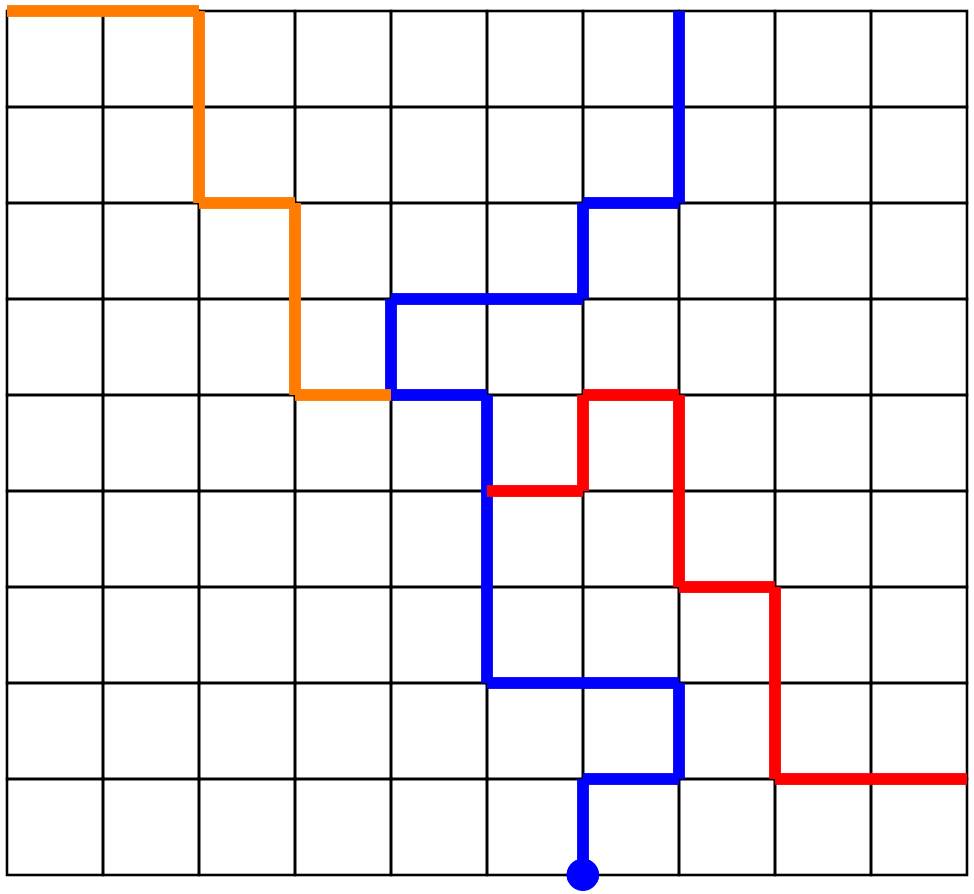
TDGGTDTDGDDTGDTGT



TDGGTDTTGDDTGDTGT

TDGGTDTDGDDTGDTGT

TDGGTDTTGTDTGDTGT



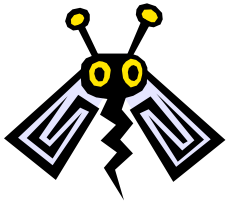
TDGGTDTTGDDTGDTGT

TDGGTDTDGDDTGDTGT

TDGGTDTTGTDTGDTGT

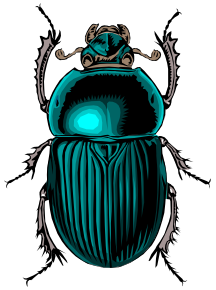
Question pour PDG

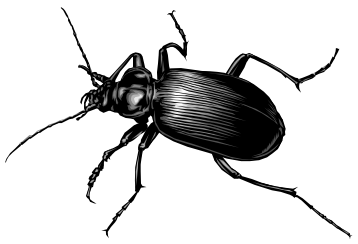
Sauriez vous faire marcher votre entreprise si tous les employés faisaient exactement ce qu'ils sont censés faire, à l'heure dite?



Travaux pratiques

- Plantages des ordinateurs, distributeurs bancaires, systèmes de réservation, sites Web, etc.
- Micro-bugs navigateurs Web => macro-attaques pirates
- Blocages de téléphones ou d'appareils photo
- Grattages de tête des conducteurs et garagistes
- Crash du téléphone interurbain américain
  une ligne mal placée sur 1 million
- Explosion d'Ariane 501, pertes de satellites
  Ariane : débordement arithmétique dans un calcul inutile
- Bug subtil dans la division flottante du Pentium
  coût : 470 millions de dollars pour Intel
- ...





A la chasse aux bugs

- Utiliser des techniques rigoureuses de génie logiciel
  - documentation, revues de code, tests intensifs
  - certification externe (avionique)
- Rendre visuel ce qui est invisible
  - environnements de débogage
  - prototypes virtuels animés
- Utiliser des méthodes formelles
  - algorithmes validés mathématiquement
  - langages de programmation plus abstraits
  - compilateurs certifiés ou vérifiés formellement

A la chasse aux bugs

- Utiliser des techniques rigoureuses de génie logiciel
  - documentation, revues de code, tests intensifs
  - certification externe (avionique)
- Rendre visuel ce qui est invisible
  - environnements de débogage
  - prototypes virtuels animés
- Utiliser des méthodes formelles
  - algorithmes validés mathématiquement
  - langages de programmation plus abstraits
  - compilateurs certifiés ou vérifiés formellement

Détecter les bugs *avant* l'exécution

La science informatique

- Théorie de l'information : coder et transporter efficacement
- Algorithmique : faire vite et bien
- Théorie de la programmation : écrire vite et juste
- Reliées : mathématiques discrètes,
  automatique & signal, analyse numérique

Bases anciennes: logique, calcul, et leurs relations

Euclide, Archimède, Brahmagupta, Al Khwarizmi, Fibonnacci
Hilbert, Church, Gödel, Turing, Von Neumann,...

L'algorithmique

texture éclairage
fusion mise 3D
contours segmentation
corrections optiques
images

trajectoires
déformations
tomographie
surfaces volumes
géométrie

gestion de trafic
diffusion
protocoles
codage
réseaux

éléments finis
matrices prog. linéaire
premiers cryptage
4 opérations
nombres

grammaires
automates
croisement
tri, recherche
classement
mots, textes

emploi du temps
circulation
routage
optimisation

Les critères algorithmiques

- La machine: séquentielle, parallèle, distribuée?
- La correction
- Le temps de calcul
- La taille mémoire
- La consommation d'énergie

Des milliers de compromis pour des milliers de problèmes

Choisir ? Analyse mathématique sophistiquée !

Structures algorithmiques

objets	bits, entiers, flottants graphes, matrices mots, images
structures de données	listes, arbres, tables, etc. tableaux, chaînages diagrammes de Voronoi
structures de contrôle	séquence, boucle récursion parallélisme synchrone parallélisme aynchrone

Principes : diviser pour régner, exploiter l'aléa, etc.

La théorie de la programmation

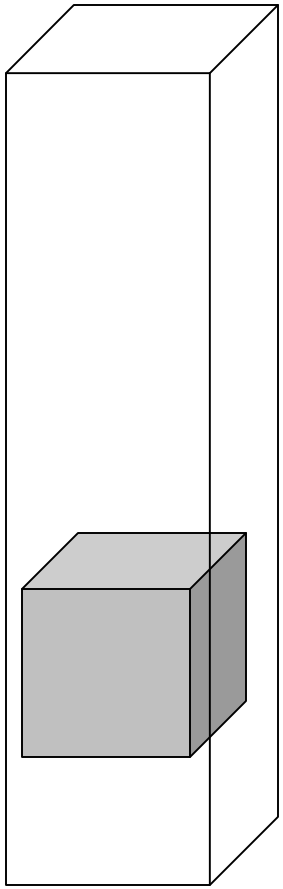
- Comment mieux programmer ?
  - langages plus abstraits, sémantique formelle
  - langage défensifs (assertions, contrats)
- Comment touver les bugs avant l'exécution?
  - analyse statique des programmes
  - vérification formelle des propriétés
- Exemple: pas de bug arithmétique sur l 'A380
  - spécifications SCADE des commandes de vol
  - interprétation abstraite

La théorie de la programmation

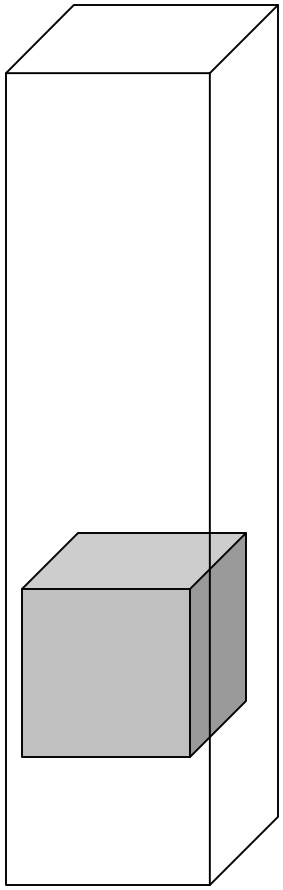
- Comment mieux programmer ?
  - langages plus abstraits, sémantique formelle
  - langage défensifs (assertions, contrats)
- Comment touver les bugs avant l'exécution?
  - analyse statique des programmes
  - vérification formelle des propriétés
- Exemple: pas de bug arithmétique sur l 'A380
  - spécifications SCADE des commandes de vol
  - interprétation abstraite

Utiliser des programmes pour calculer sur les programmes
... sans se mordre la queue !

Exemple : l'ascenseur

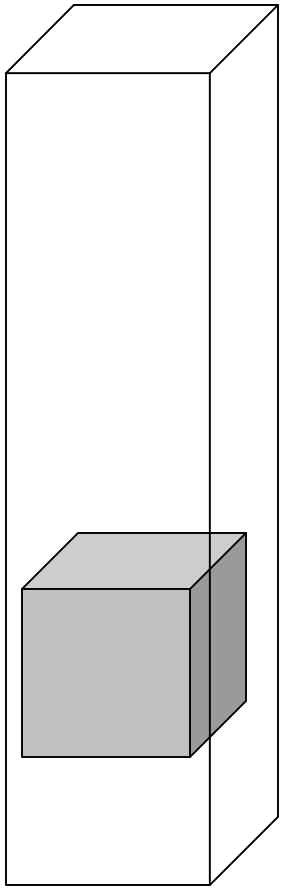


Exemple : l'ascenseur



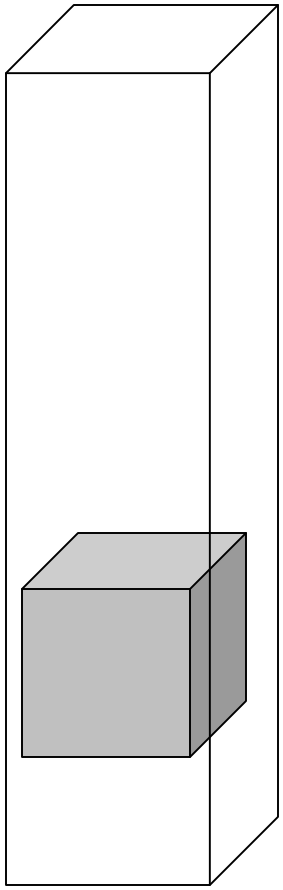
- Sûreté : l'ascenseur ne voyage jamais la porte ouverte

Exemple : l'ascenseur



- Sûreté : l'ascenseur ne voyage jamais la porte ouverte

Exemple : l'ascenseur



- Sûreté : l'ascenseur ne voyage jamais la porte ouverte

- Vivacité : l'ascenseur atteint tous les étages et y ouvre ses portes (plus dur)

L'informatique et les autres sciences

Les mathématiques ont une réussite insolente en sciences

Eugene Wigner

L'informatique et les autres sciences

Les mathématiques ont une réussite insolente en sciences

Eugene Wigner

Même chose pour l'informatique, pour les mêmes raisons !

L'informatique et les autres sciences

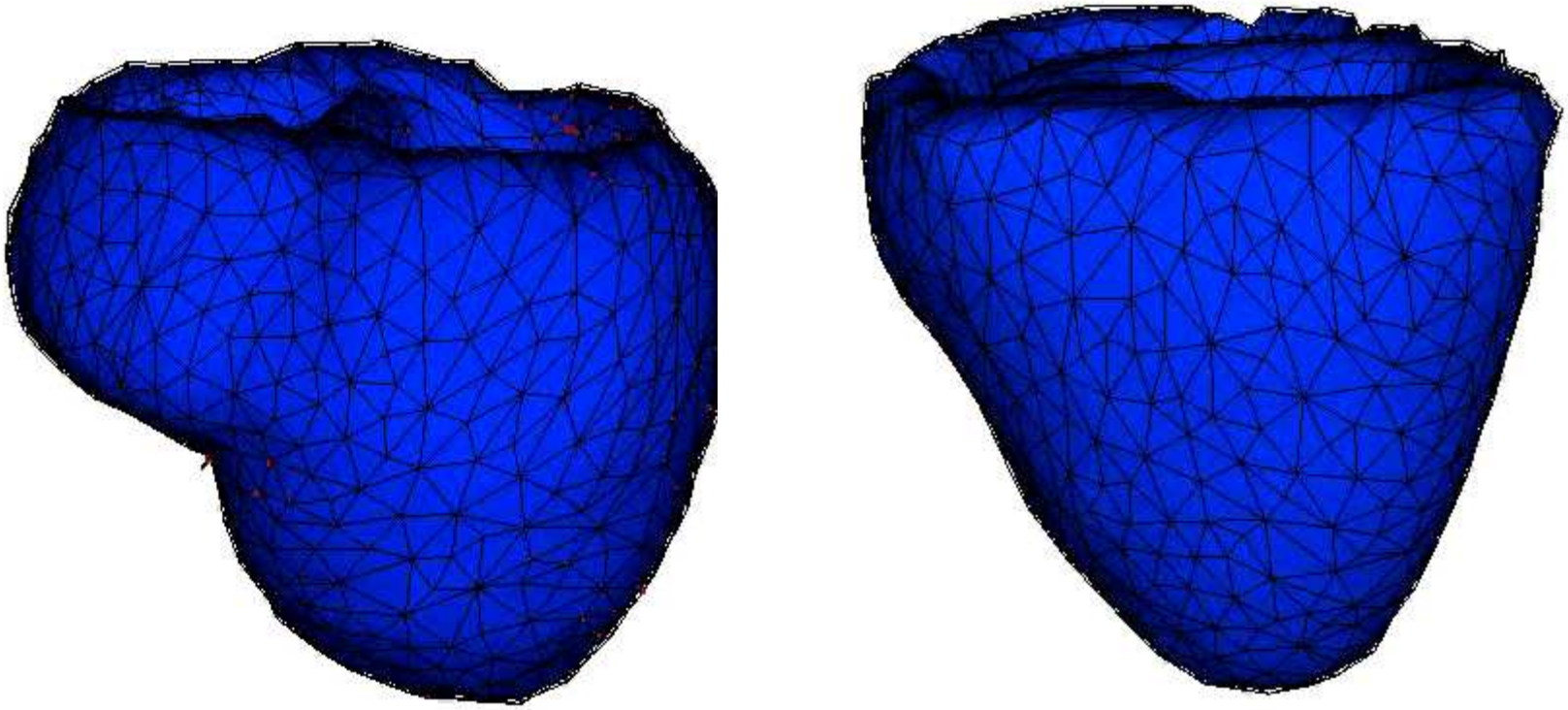
Les mathématiques ont une réussite insolente en sciences

Eugene Wigner

Même chose pour l'informatique, pour les mêmes raisons !

- Publication scientifique : journaux numériques
- Calcul formel, mathématiques formelles
- Modélisation / simulation numérique
- Physique : instruments numériques ou virtuels
- Médecine : imagerie numérique
  chirurgie robotisée
  prothèses intelligentes
- Biochimie : géométrie des interactions
  transferts d'information

Simulation d'un infarctus



Source INRIA

Grandes questions

- Saurons nous contrôler les bugs, ou vivre avec ?
- Et inventer des principes de calcul moins brutaux ?
- Pourrons nous être en sécurité informatique ?
- Allons nous contrôler l'informatique ubiquitaire
  ou bien tomber dans Big Brother ?
- Le sujet est-t-il pris à son importance réelle ?
  Dans l'industrie, la recherche, l'enseignement ?

- Le sujet est-t-il pris à son importance réelle ?

  Dans l'industrie, la recherche, l'enseignement ?