

Pannes dans les circuits électroniques : faut-il croire nos ordinateurs ?

Arnaud Tisserand

CNRS, IRISA, équipe-projet CAIRN

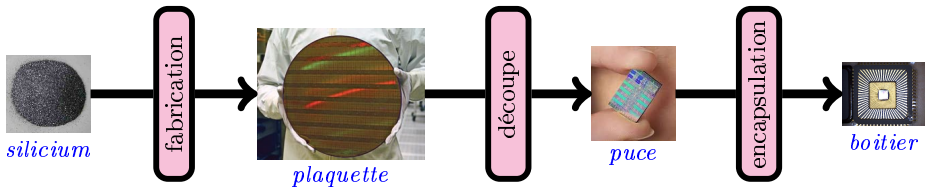
Fête de la science, 10–12 octobre 2014



Plan de l'exposé

- Les circuits intégrés :
 - ▶ Technologies de fabrication
 - ▶ Évolution
 - ▶ Exemples de (micro-)processeurs
- Pannes et fautes dans les circuits intégrés
 - ▶ Problèmes de vieillissement
 - ▶ Problèmes de rayonnement
- Techniques de protection
 - ▶ technologies robustes
 - ▶ redondance(s)
 - ▶ codage spécial des données et des calculs
- Nos activités de recherche autour de ce thème

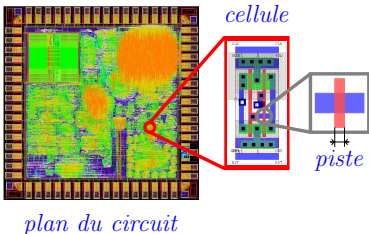
Technologie des puces électroniques



Technologies actuelles : 250 à 15 nm

Transistor : élément de base

Épaisseur d'un cheveu : 40 à 100 μm

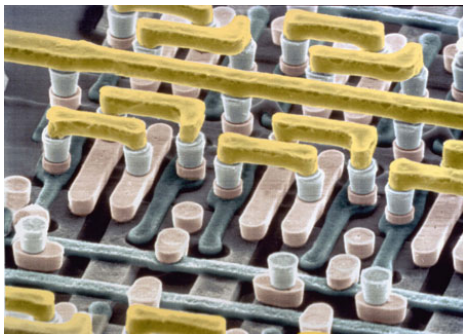
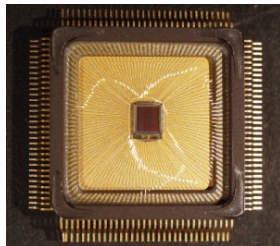
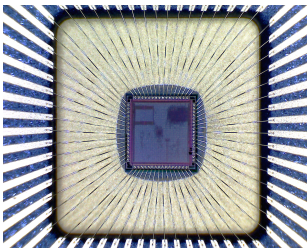


1 m	1 mm	1 μm	1 nm
1	0.001	0.000 001	0.000 000 001

1 Hz	1 kHz	1 MHz	1 GHz
1	1 000	1 000 000	1 000 000 000

1 Hz = 1 cycle/s (ou opération/s)

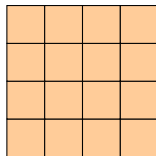
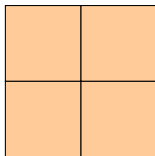
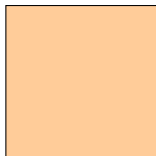
Intérieur d'un circuit intégré



Évolution des puces électroniques

grandeurs	unités	1970	1980	1990
technologie	nm	6 000	1 500	800
nb. transistors	Tr	2 000	100 000	2 000 000
fréquence	Hz	100 kHz	20 MHz	200 MHz

grandeurs	unités	2000	2010	2020
technologie	nm	180	32	5–10 ?
nb. transistors	Tr	200 000 000	1 000 000 000	???
fréquence	Hz	2 GHz	3 GHz	5–10 GHz ???



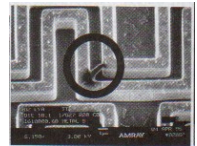
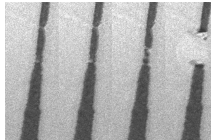
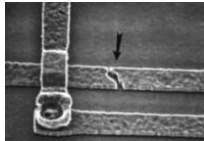
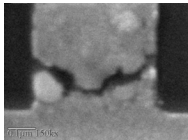
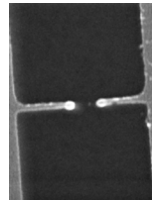
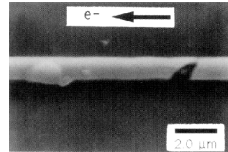
Exemples de processeurs actuels

processeur	MSP 430	Xeon E7-8890 v2
type	micro-contrôleur faible conso.	processeur haut de gamme
fabricant	Texas Instruments	Intel
données	16 bits	64 bits
instructions	1 / cycle	30 / cycle (avec 15 cœurs)
fréquence	4 – 24 MHz	2.8 – 3.4 GHz
tension	1.8 – 3.6 V	0.6 – 1.3 V
puissance	3.5 mW à 10 MHz	155 W
c. sommeil	0.5 – 50 μ A	n.c.
prix	1 – 7 €	$\approx$ 5 500 €
technologie	250 nm	22 nm

Fautes liées à des problèmes de vieillissement

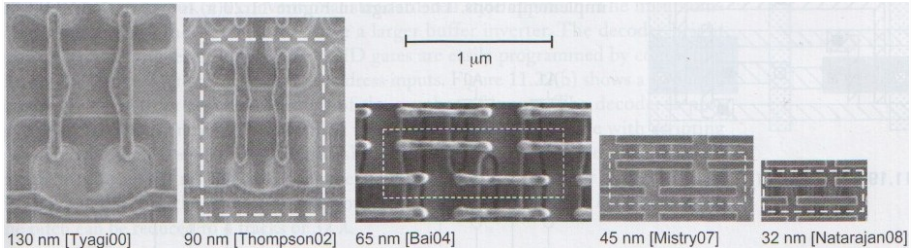
Sources possibles :

- température
- vibrations
- usure mécanique (pattes)
- électro-migration
- diffusion des porteurs
- dégradation chimique
- etc



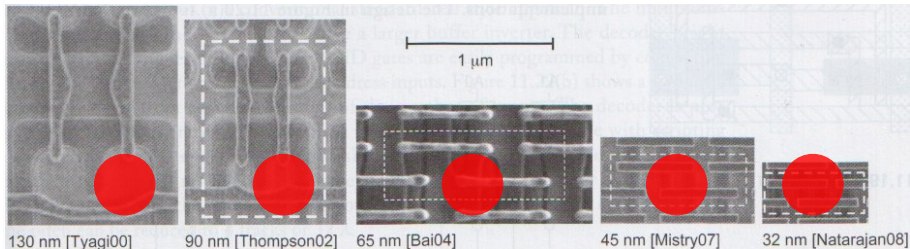
Fautes liées à des problèmes de rayonnement(s)

Exemples de cellules mémoires (1 bit) dans différentes technologies :



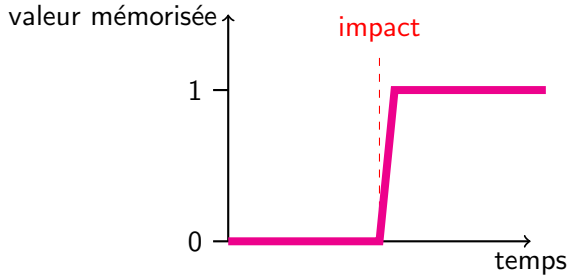
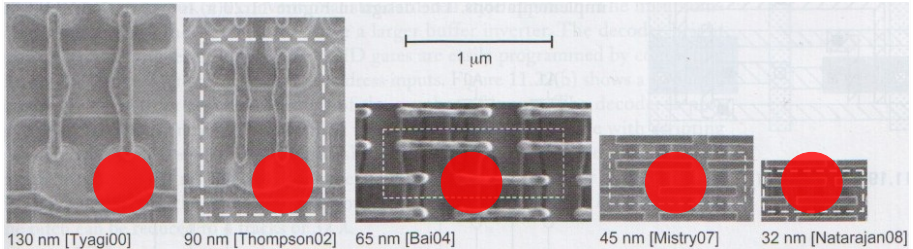
Fautes liées à des problèmes de rayonnement(s)

Exemples de cellules mémoires (1 bit) dans différentes technologies :



Fautes liées à des problèmes de rayonnement(s)

Exemples de cellules mémoires (1 bit) dans différentes technologies :



Aspects statistiques

Les fautes en un point du circuit à un instant donné sont **très très rares**.



Aspects statistiques

Les fautes en un point du circuit à un instant donné sont **très très rares**.

Oui mais . . . on a des **milliards de transistors** dans un seul circuit et ils **fonctionnent à plusieurs GHz** !



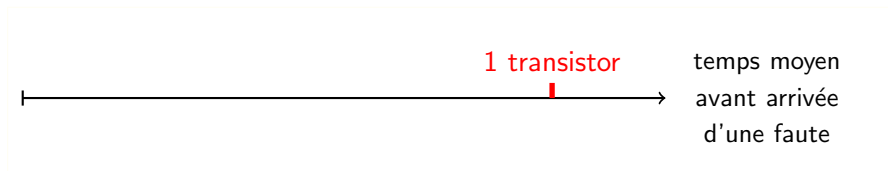
Aspects statistiques

Les fautes en un point du circuit à un instant donné sont **très très rares**.

Oui mais . . . on a des **milliards de transistors** dans un seul circuit et ils **fonctionnent à plusieurs GHz !**

Exemples :

- un transistor fiable pendant 1 000 000 000 h **en moyenne**



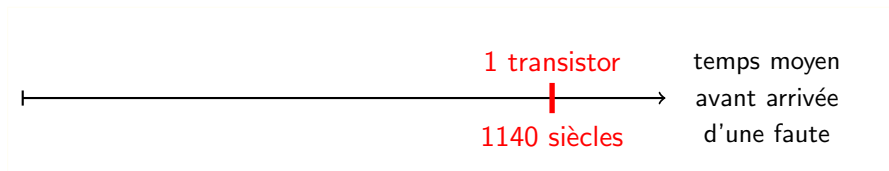
Aspects statistiques

Les fautes en un point du circuit à un instant donné sont **très très rares**.

Oui mais . . . on a des **milliards de transistors** dans un seul circuit et ils **fonctionnent à plusieurs GHz** !

Exemples :

- un transistor fiable pendant 1 000 000 000 h **en moyenne**



$$\frac{1\,000\,000\,000}{24 \times 365.25 \times 100} \approx 1140 \text{ siècles}$$

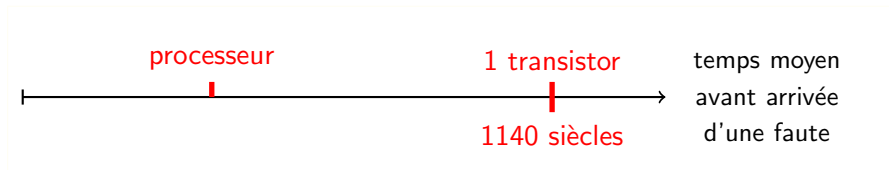
Aspects statistiques

Les fautes en un point du circuit à un instant donné sont **très très rares**.

Oui mais . . . on a des **milliards de transistors** dans un seul circuit et ils **fonctionnent à plusieurs GHz** !

Exemples :

- un transistor fiable pendant 1 000 000 000 h **en moyenne**
- processeur composé de 1 000 000 000 de transistors



$$\frac{1\,000\,000\,000}{24 \times 365.25 \times 100} \approx 1140 \text{ siècles}$$

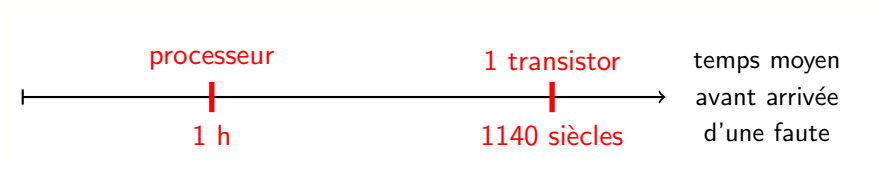
Aspects statistiques

Les fautes en un point du circuit à un instant donné sont **très très rares**.

Oui mais . . . on a des **milliards de transistors** dans un seul circuit et ils **fonctionnent à plusieurs GHz** !

Exemples :

- un transistor fiable pendant 1 000 000 000 h **en moyenne**
- processeur composé de 1 000 000 000 de transistors



$$\frac{1\,000\,000\,000}{24 \times 365.25 \times 100} \approx 1140 \text{ siècles}$$

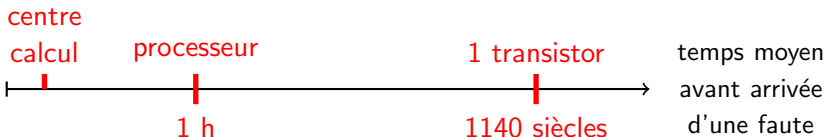
Aspects statistiques

Les fautes en un point du circuit à un instant donné sont **très très rares**.

Oui mais . . . on a des **milliards de transistors** dans un seul circuit et ils **fonctionnent à plusieurs GHz !**

Exemples :

- un transistor fiable pendant 1 000 000 000 h **en moyenne**
- processeur composé de 1 000 000 000 de transistors
- centre de calcul composé de 1 000 processeurs



$$\frac{1\,000\,000\,000}{24 \times 365.25 \times 100} \approx 1140 \text{ siècles}$$

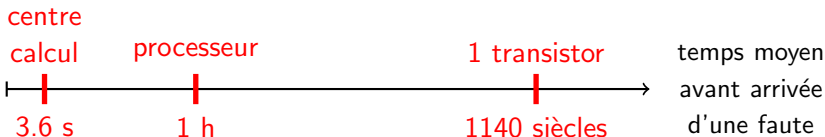
Aspects statistiques

Les fautes en un point du circuit à un instant donné sont **très très rares**.

Oui mais . . . on a des **milliards de transistors** dans un seul circuit et ils **fonctionnent à plusieurs GHz** !

Exemples :

- un transistor fiable pendant 1 000 000 000 h **en moyenne**
- processeur composé de 1 000 000 000 de transistors
- centre de calcul composé de 1 000 processeurs



$$\frac{1\,000\,000\,000}{24 \times 365.25 \times 100} \approx 1140 \text{ siècles}$$

Quelques techniques de protection utilisées en pratique

- Utiliser des transistors plus gros ou des technologies moins avancées quand c'est possible

Quelques techniques de protection utilisées en pratique

- Utiliser des transistors plus gros ou des technologies moins avancées quand c'est possible
- Utiliser des technologies « durcies » (très coûteux)

Quelques techniques de protection utilisées en pratique

- Utiliser des transistors plus gros ou des technologies moins avancées quand c'est possible
- Utiliser des technologies « durcies » (très coûteux)
- Utiliser de la redondance
 - ▶ Spatiale/physique (plusieurs « blocs » font la même chose)
 - ▶ Temporelle (en refait le même « calcul » plusieurs fois)

Quelques techniques de protection utilisées en pratique

- Utiliser des transistors plus gros ou des technologies moins avancées quand c'est possible
- Utiliser des technologies « durcies » (très coûteux)
- Utiliser de la redondance
 - ▶ Spatiale/physique (plusieurs « blocs » font la même chose)
 - ▶ Temporelle (en refait le même « calcul » plusieurs fois)
- Utiliser des codes correcteurs d'erreur

Technique(s) de codage de l'information permettant de tester si la donnée est bonne ou pas

Quelques techniques de protection utilisées en pratique

- Utiliser des transistors plus gros ou des technologies moins avancées quand c'est possible
- Utiliser des technologies « durcies » (très coûteux)
- Utiliser de la redondance
 - ▶ Spatiale/physique (plusieurs « blocs » font la même chose)
 - ▶ Temporelle (en refait le même « calcul » plusieurs fois)
- Utiliser des codes correcteurs d'erreur

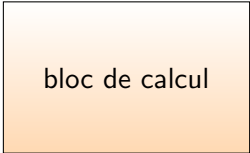
Technique(s) de codage de l'information permettant de tester si la donnée est bonne ou pas
- Techniques avancées de représentation des données et des calculs

Quelques techniques de protection utilisées en pratique

- Utiliser des transistors plus gros ou des technologies moins avancées quand c'est possible
- Utiliser des technologies « durcies » (très coûteux)
- Utiliser de la redondance
 - ▶ Spatiale/physique (plusieurs « blocs » font la même chose)
 - ▶ Temporelle (en refait le même « calcul » plusieurs fois)
- Utiliser des codes correcteurs d'erreur

Technique(s) de codage de l'information permettant de tester si la donnée est bonne ou pas
- Techniques avancées de représentation des données et des calculs
- Etc

Techniques de redondance spatiale/physique



A diagram showing a single rectangular block with a light orange-to-white gradient and a black border. The text "bloc de calcul" is centered within the block.

bloc de calcul

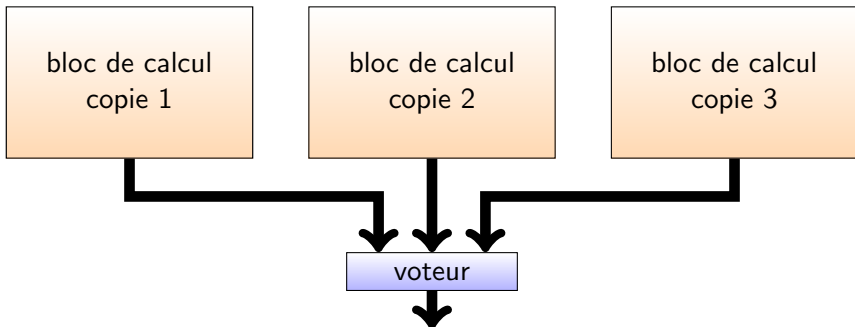
Techniques de redondance spatiale/physique

bloc de calcul
copie 1

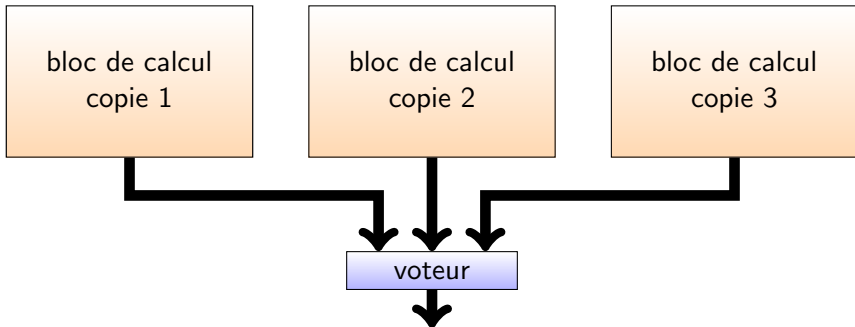
bloc de calcul
copie 2

bloc de calcul
copie 3

Techniques de redondance spatiale/physique



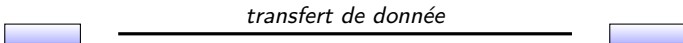
Techniques de redondance spatiale/physique



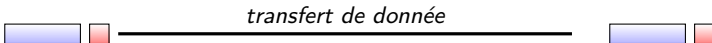
Domaines d'application :



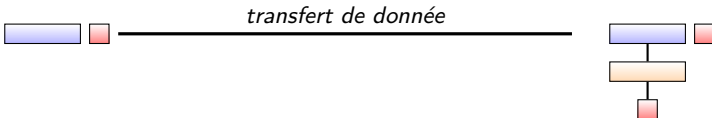
Techniques de protection avancées



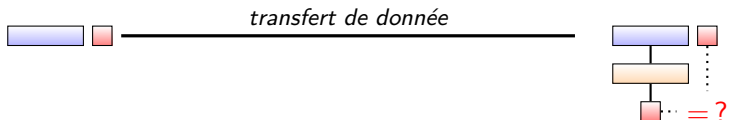
Techniques de protection avancées



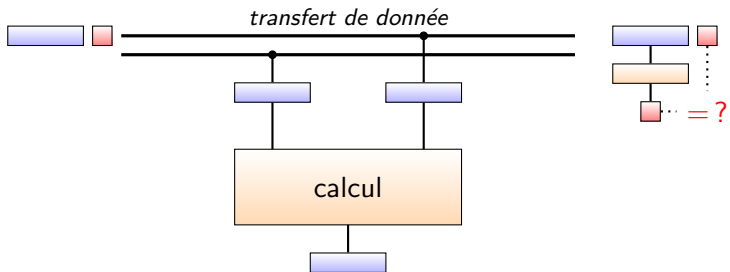
Techniques de protection avancées



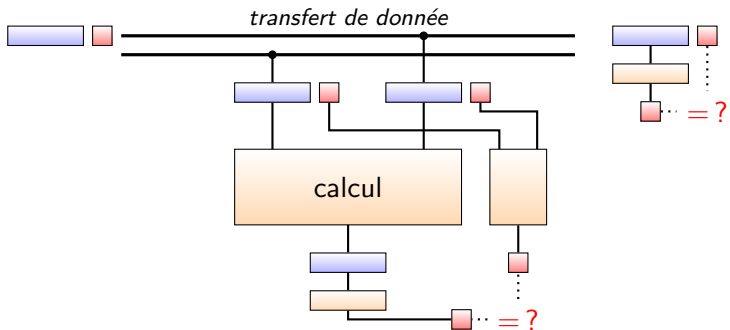
Techniques de protection avancées



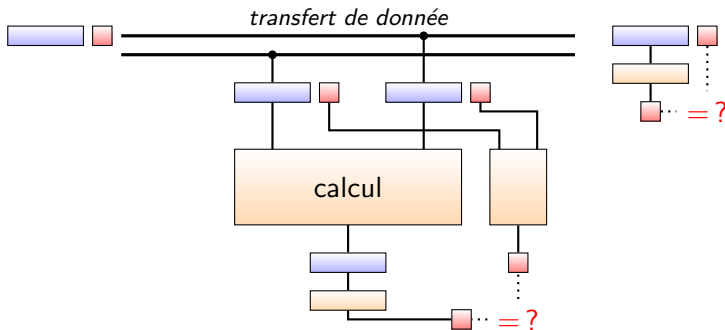
Techniques de protection avancées



Techniques de protection avancées



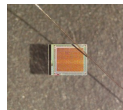
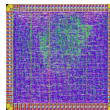
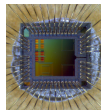
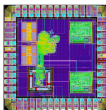
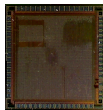
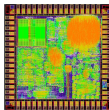
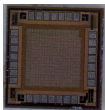
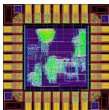
Techniques de protection avancées



Compromis entre coût supplémentaire, baisse des performances et augmentation de la fiabilité (travaux actuels)

Nos activités de recherche autour de ce thème

- Circuits électroniques robustes et à basse consommation d'énergie :
 - ▶ processeurs
 - ▶ accélérateurs de calcul (vidéo, cryptographie)
 - ▶ circuits reconfigurables
 - ▶ algorithmes de calcul et représentations des nombres
 - ▶ outils de conception de circuit avancés
- Domaines d'application :
 - ▶ calculs embarqués
 - ▶ communications sans fil
 - ▶ réseaux de capteurs intelligents
 - ▶ sécurité (protections contre des attaques par injection de fautes)
 - ▶ etc



Fin, des questions ?

Contact:

- <mailto:arnaud.tisserand@irisa.fr>
- <http://people.irisa.fr/Arnaud.Tisserand/>
- Equipe-projet CAIRN <http://www.irisa.fr/cairn/>
- Laboratoire IRISA, CNRS–INRIA–Univ. Rennes 1
6 rue Kerampont, CS 80518, F-22305 Lannion cedex, France

Merci