# Un circuit de réception GPS tolérant aux erreurs de l'électronique


**Mohamed Mourad HAFIDHI**

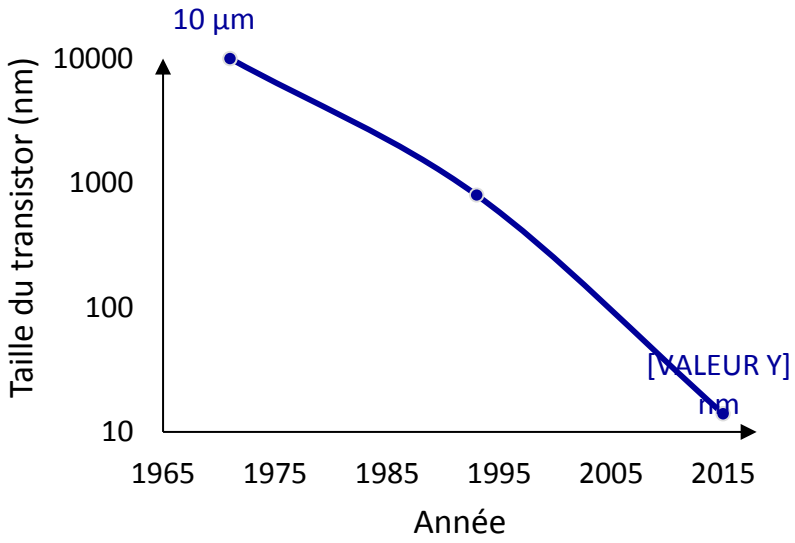
**Directeur de thèse** : Emmanuel BOUTILLON

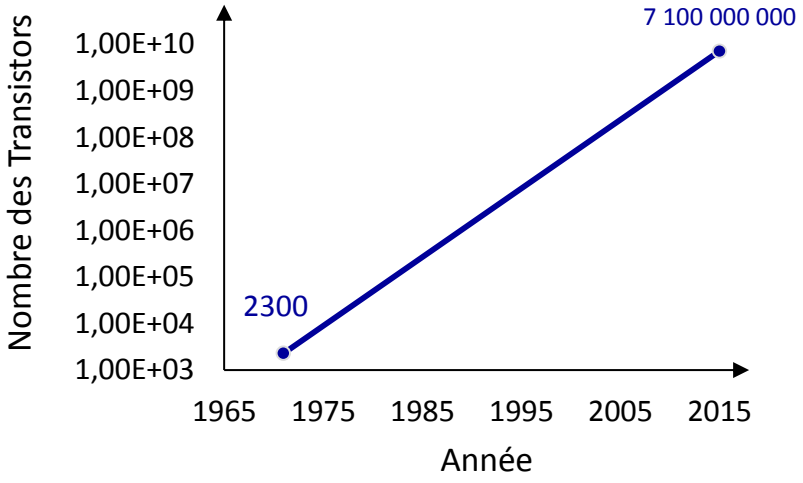


**Project RELIABLE ASIC (RELIASIC)**

# Motivations

- Miniaturisation des transistors et la réalisation des circuits complexes sur peu d'espace.



# Motivations

- Continuer à réduire la taille des transistors.
- Continuer à réduire les tensions d'alimentation

} Plus de calcul par $mm^2$ et par Joule

- Problème : plus de sensibilité aux variations technologiques et environnementales (température, tension, perturbation électromagnétique, radiations …).

=> Apparition de différents types d'erreurs :

Chemin critique (timing errors),
Transitoires (SEU),
Permanentes (stuck at 0 or 1).

Considérer la fiabilité dans la conception des prochaines applications

# Projet RELIASIC (Reliable ASIC)

- **Objectifs:**
  - Etudier la fiabilité des applications de traitement numérique du signal (TNS) et proposer de nouvelles techniques pour la tolérance aux fautes.
  - Considérer un exemple d'application (récepteur GPS) et améliorer sa robustesse face aux erreurs.
  - Concevoir un ASIC avec deux versions: une de référence, et une intégrant les mécanismes de correction.

- **Etablissements**

IETR (INSA, Nantes), IRISA (UR1), Lab-STICC (UBS, UBO, IMT Atlantique)

# Objectifs de la Thèse

- Contribuer à la fiabilité des applications de traitement numérique du signal avec de nouvelles techniques de tolérance aux fautes.

- Considérer un exemple d'application de TNS (la fonction de poursuite des signaux GPS) et améliorer sa robustesse face aux erreurs.

- Préparer la version robuste de la fonction de poursuite et de l'environnement de test de l'ASIC (VHDL, code C, carte FPGA).

# Plan de la présentation

1. *Tolérance aux fautes pour des applications de TNS.*

2. *Robustesse d'un canal de poursuite GPS.*

3. *Plateforme d'expérimentation et de mesures.*

*Conclusion et perspectives.*

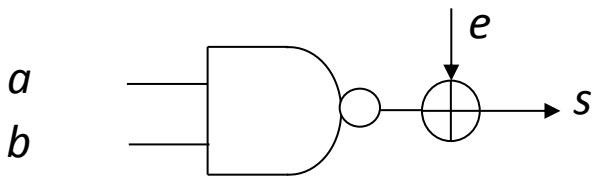
# Plan de la présentation

1. *Tolérance aux fautes pour des applications de TNS.*
   a. *Architectures existantes.*
   b. *Architecture de correction basée sur le calcul des syndromes (DSC).*
2. *Robustesse d'un canal de poursuite GPS.*
3. *Plateforme d'expérimentation et de mesures.*

*Conclusion et perspectives.*

# La solution de Von Neumann

- Est-il possible de construire une « méta porte NAND » arbitrairement robuste avec partir de cette porte NAND bruité ?

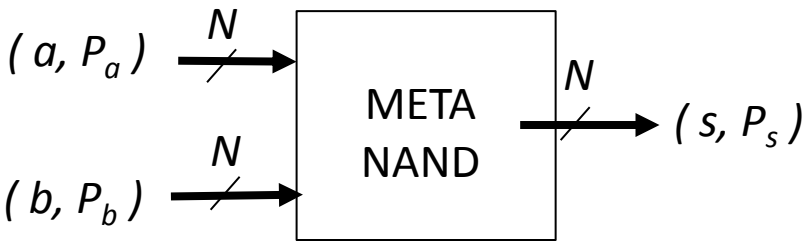



Prob($e$=1)= $\varepsilon$

- <u>Théorème d'existence de Von Neumann</u> : Si $\varepsilon$ < 0,16, on peut obtenir une porte arbitrairement fiable (Meta NAND).

- <u>Comment</u> : en représentant chaque variable comme un vecteur de taille N correspondant à une réplication bruitée de son état.

- Variable $a \Rightarrow (a_1, a_2, \ldots, a_N)$, $P(a_i \neq a) = p_a$.




$s = a$ NAND $b$

$P_s \leq P_e = \max(P_a, P_b)$

# Différentes formes de redondance

- Quatre formes de redondances existent :

1. La redondance logicielle : différentes versions de programmes pour une même fonction.

2. La redondance d'information : utiliser le concept des codes correcteurs d'erreurs.

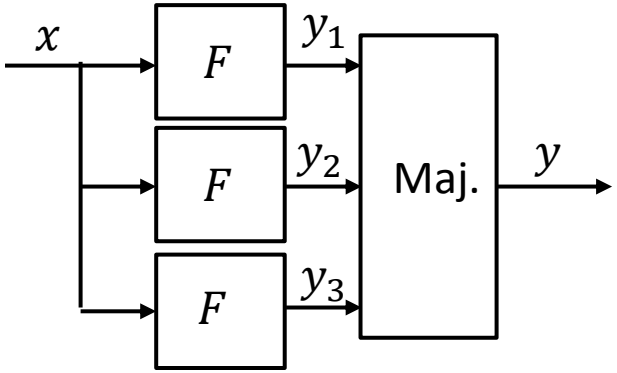
3. La redondance matérielle : du matériel supplémentaire à ajouter sur le circuit.

4. La redondance temporelle : prévoir du temps supplémentaire pour répéter une opération échouée.

# Architectures existantes

- **Triple Modular Redundancy [E. Lyons et al. 1962]**
  - La redondance matérielle/information.
  - Applications critiques (espace, avionique et santé …).

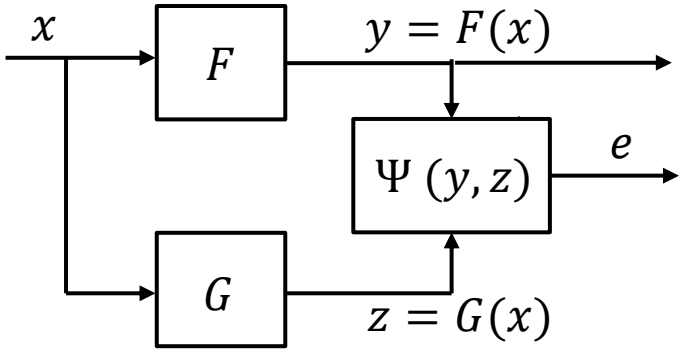
    Architectures similaires: TMR 3 voters [C. Winstead et al. 2011], RFB [Y. Tang 2013] …




- **Codes détecteurs d'erreurs**
  - La redondance matérielle/information/temporelle.
  - Ex1: $y = F(x_1,x_2) = x_1 * x_2$, $z = x_1 \pmod 3 * (x_2 \bmod 3)$

    $\Psi(y,z)$ vérifie si $y \bmod 3 = z$
  - Ex2: $y = F(x) = FFT(x)$, $z = ||x||^2$

    $\Psi(y,z)$ vérifie si $||x||^2 = ||y||^2$
  - Ex3: $F = G$, F(y,z) est une simple comparaison

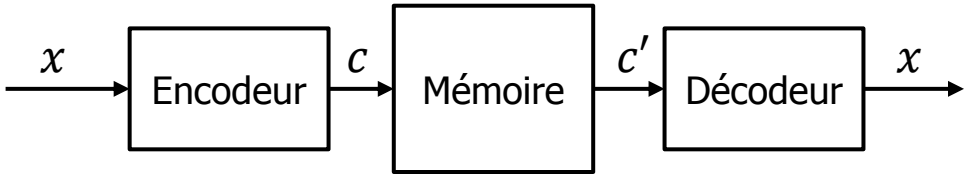



=> Détection de la présence d'anomalie sur le calcul sans pouvoir la localiser.

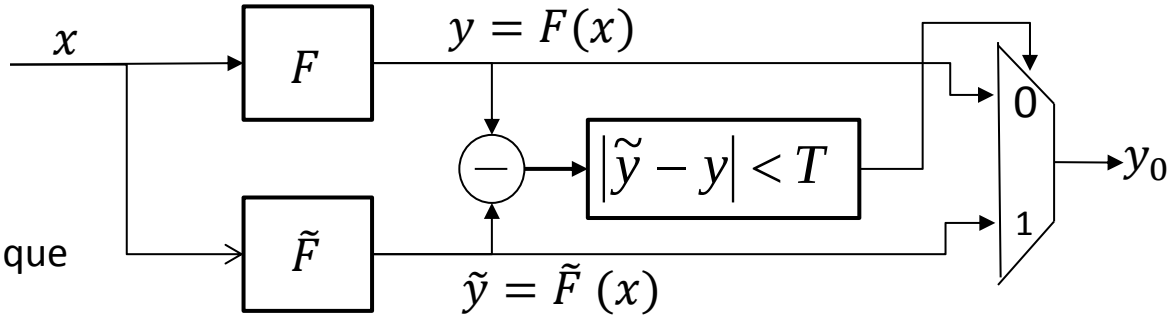
=> Répéter le calcul au cycle suivant.

# Architectures existantes

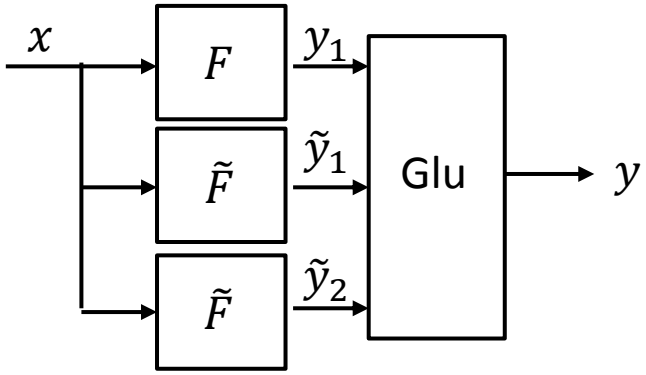
- **Codes Correcteurs d'erreurs** [V. Gherman et al. 2009]
  - $x = (x_1, x_1, \dots, x_N)$
  - $c = (x_1, x_1, \dots, x_N, x_{N+1}, \dots, x_{N+M})$




- **Algorithmic Noise Tolerance (ANT):** [R. Hegde 1990]
  - $y$: sortie à précision complète.
  - $\tilde{y}$: sortie à précision réduite.
  - $\tilde{F}$ consomme moins d'énergie que la fonction d'origine $F$.



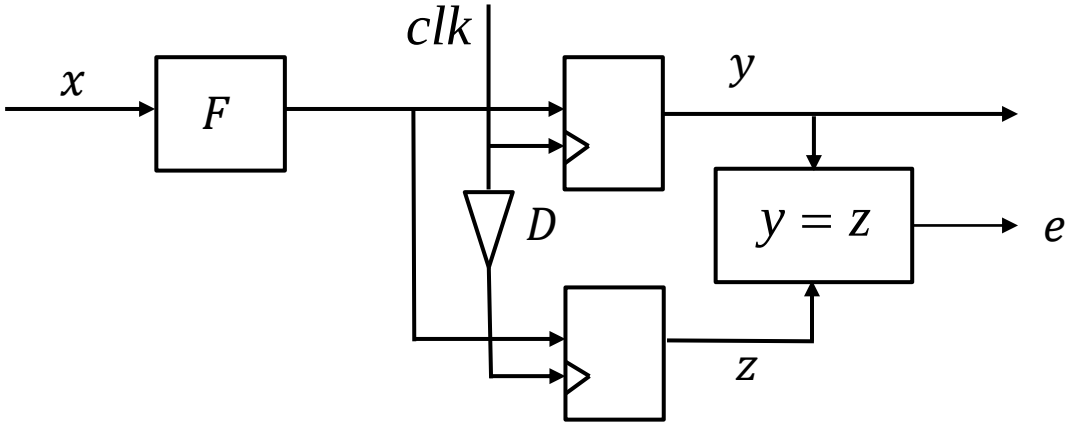

- **Algorithmic Soft Error Tolerance (ASET)** [B. Shim et al. 2004]
  - Une deuxième réplique $\tilde{F}$ simplifiée.
  - La distance entre les différentes sorties détermine la sortie globale du système.



# Architectures existantes

**<u>Razors Systems:</u>** [D. Ernst et al. 2003]

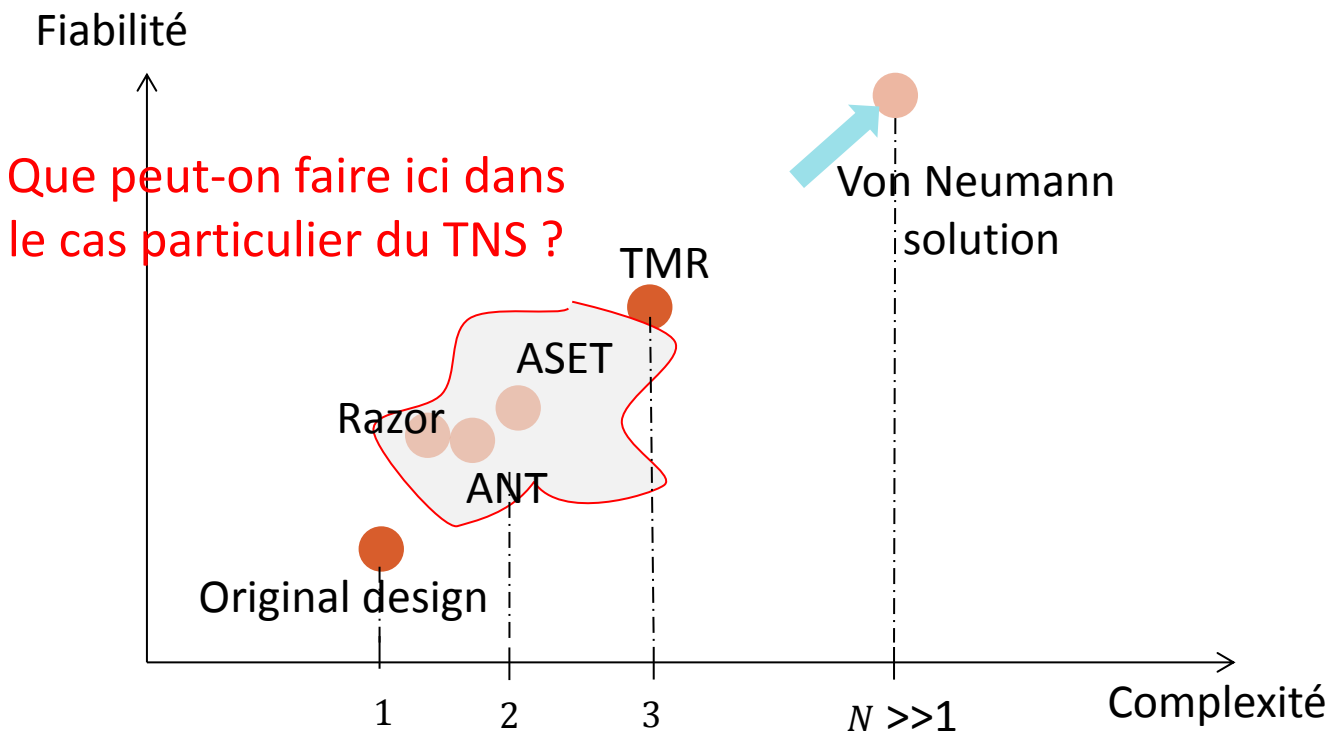
- La redondance temporelle.
- Observer la sortie de la fonction $F$ à deux instants $T_{clk}$ et $T_{clk}$ + D pour détecter l'occurrence des erreurs de timing ou des erreurs transitoires.




- Faible coût de surface par rapport aux autres types de redondances.
- Dégradation de performance (au moins 1 cycle d'horloge pour la détection et la correction).

<u>Architectures similaires:</u> TMR Temporel, TIMBER [M. Choudhury et al. 2010].

# Courbe de Pareto Fiabilité = f (Complexité)



# Plan de la présentation

1. *Tolérance aux fautes pour des applications de TNS.*
   a. *Architectures existantes.*
   b. *Architecture de correction basée sur le calcul des syndromes (DSC).*
2. *Robustesse d'un canal de poursuite GPS.*
3. *Plateforme d'expérimentation et de mesures.*

*Conclusion et perspectives.*

# Observations

- Les applications de TNS intègrent des morphismes, i.e., des fonctions vérifiant :

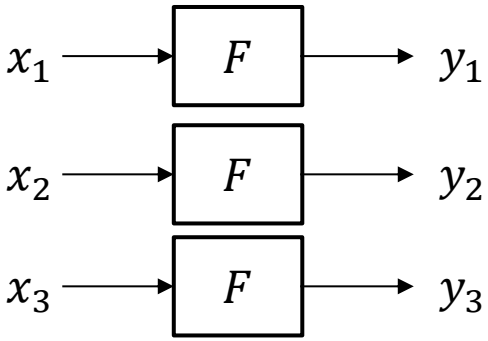
$$F: \mathrm{P} \rightarrow \mathrm{S}$$

$$\forall \quad x_1, x_2 \in \mathrm{P},\ F(x_1 + x_2) = F(x_1) + F(x_2)$$

(E,+) et (S,+) sont des groups

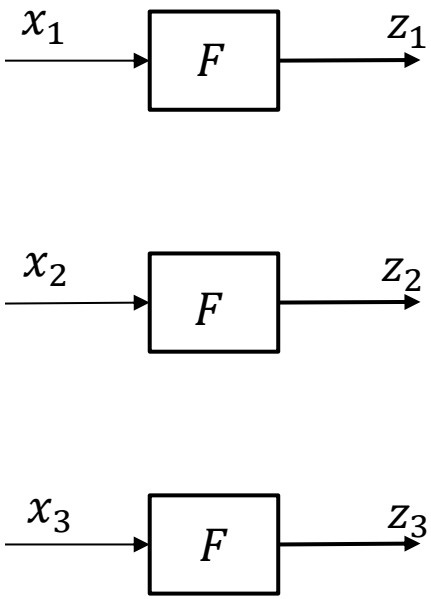
<u>Exemples</u>: *y = a.x; Y = A.X; Y = FFT(X); y(n) = h*x(n); Y(x) = M(x).A(x)mod P(x);*

- Une fonction $F$ est instanciée plusieurs fois dans un design.

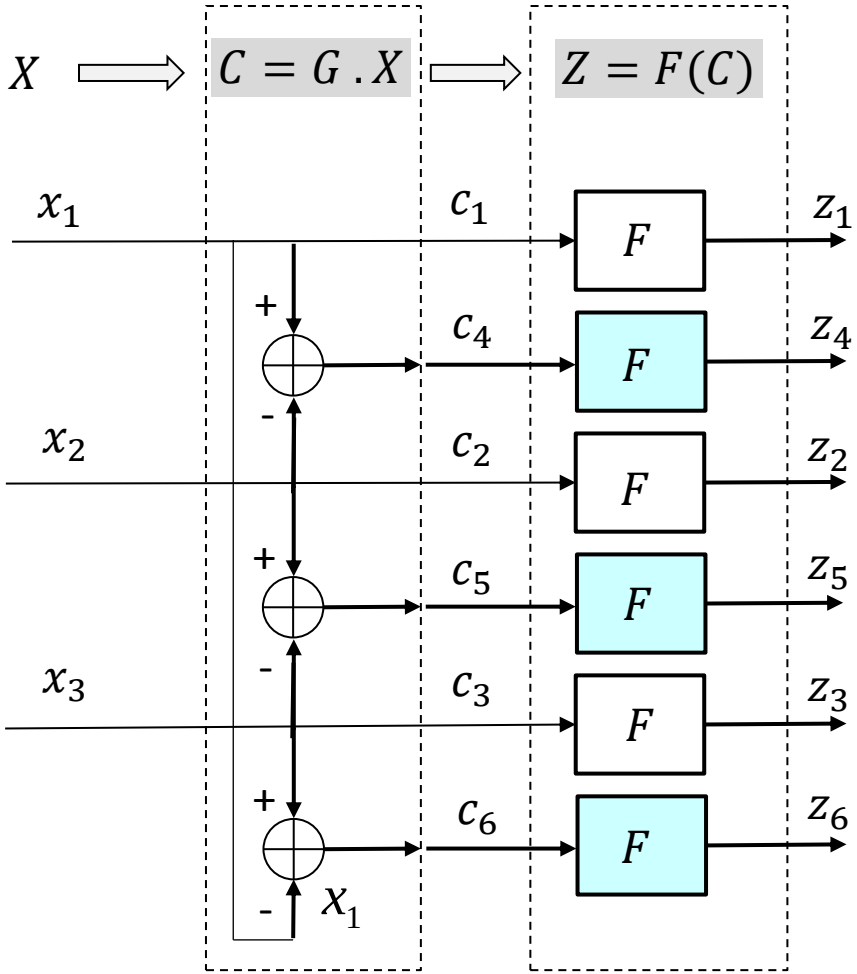



=> Comment utiliser ces propriétés pour améliorer la tolérance d'une application de TNS face aux erreurs ?

# Duplication with Syndrome based Correction (DSC)



# Duplication with Syndrome based Correction (DSC)




$$c_4 = x_1 - x_2$$

$$z_4 = F(c_4) = F(x_1 - x_2)$$

$$z_4 = F(x_1) - F(x_2)$$

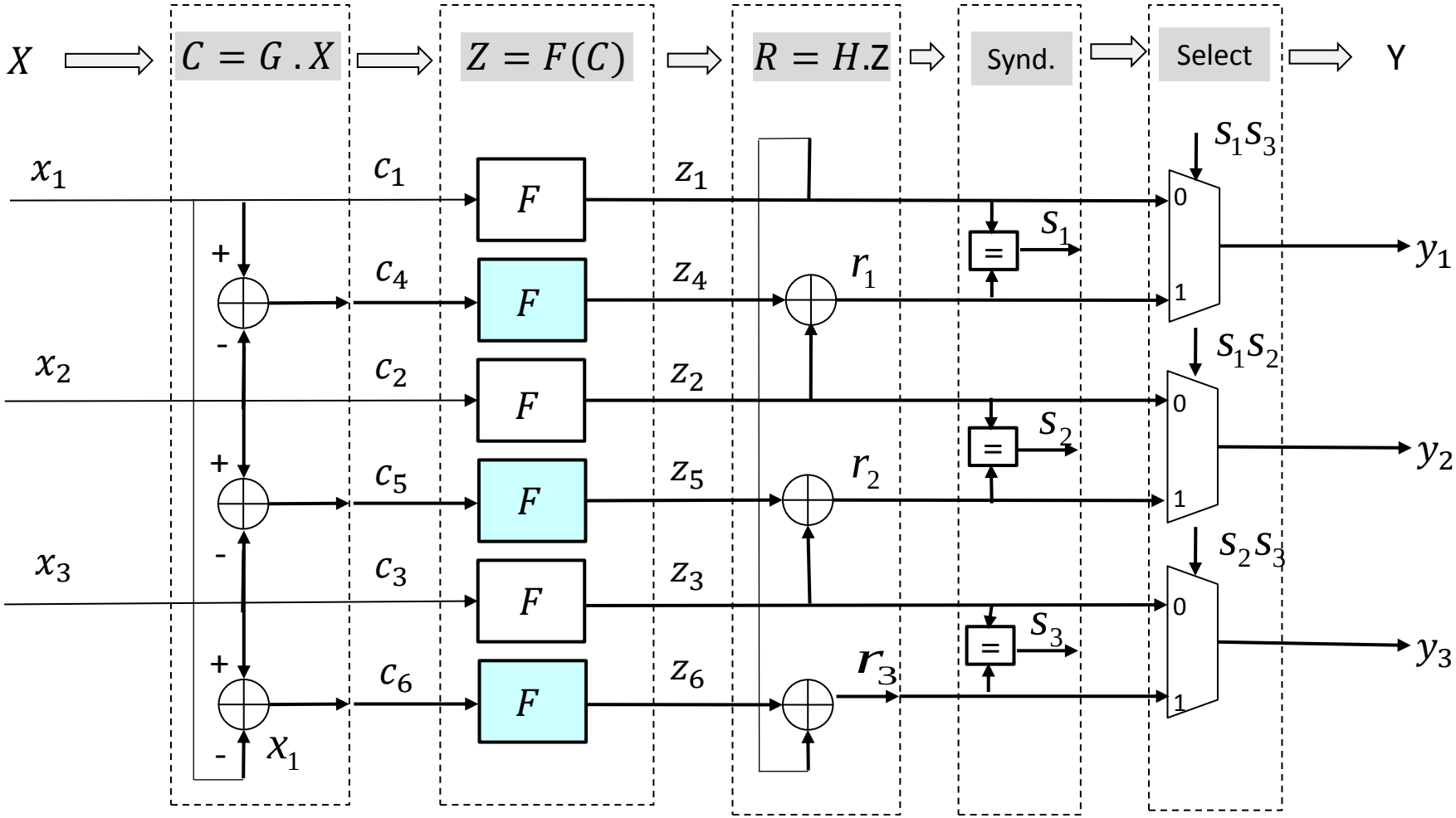
$$z_4 = z_1 - z_2$$

$$z_4 + z_2 = z_1$$

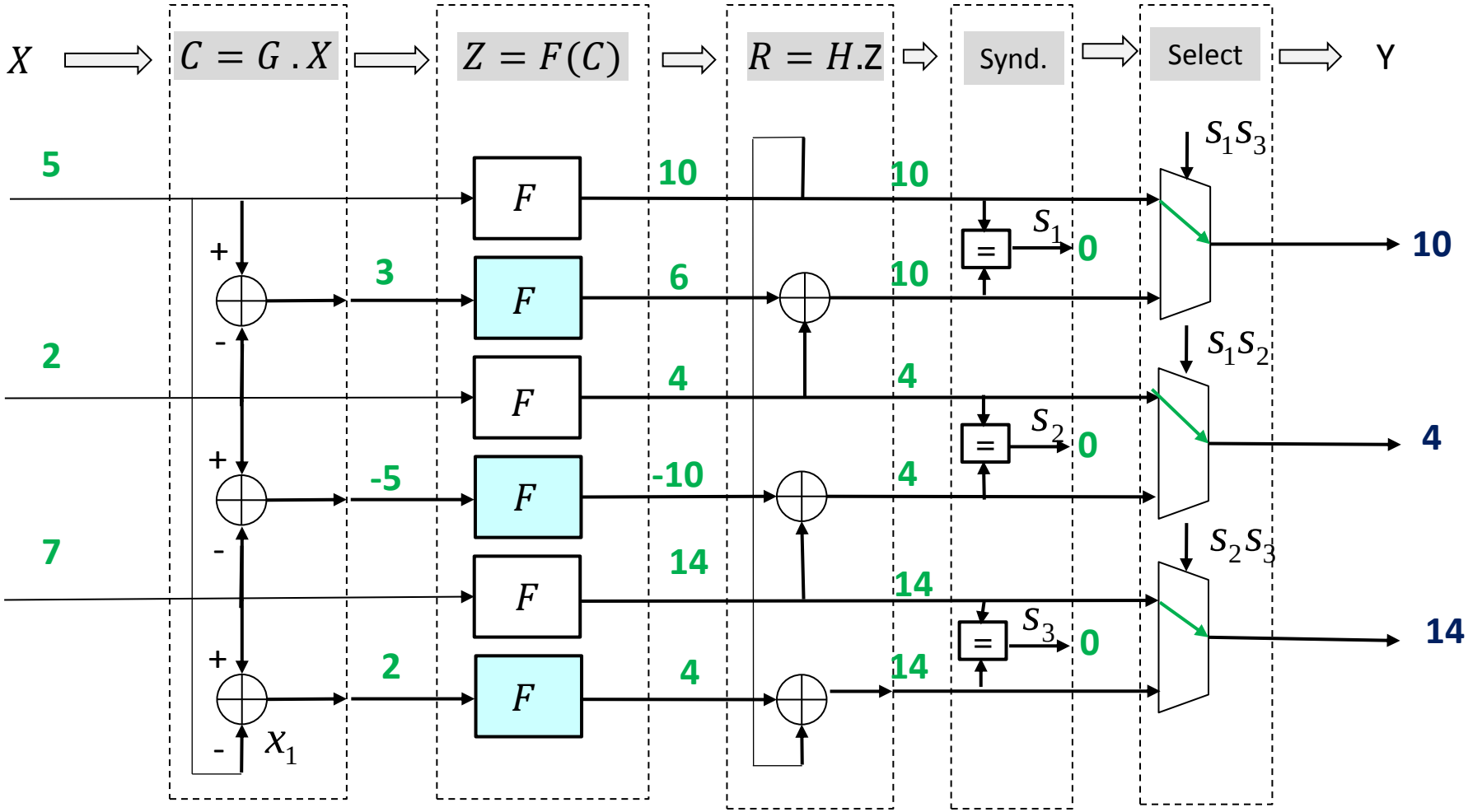
$$z_5 + z_3 = z_2$$

$$z_6 + z_1 = z_3$$

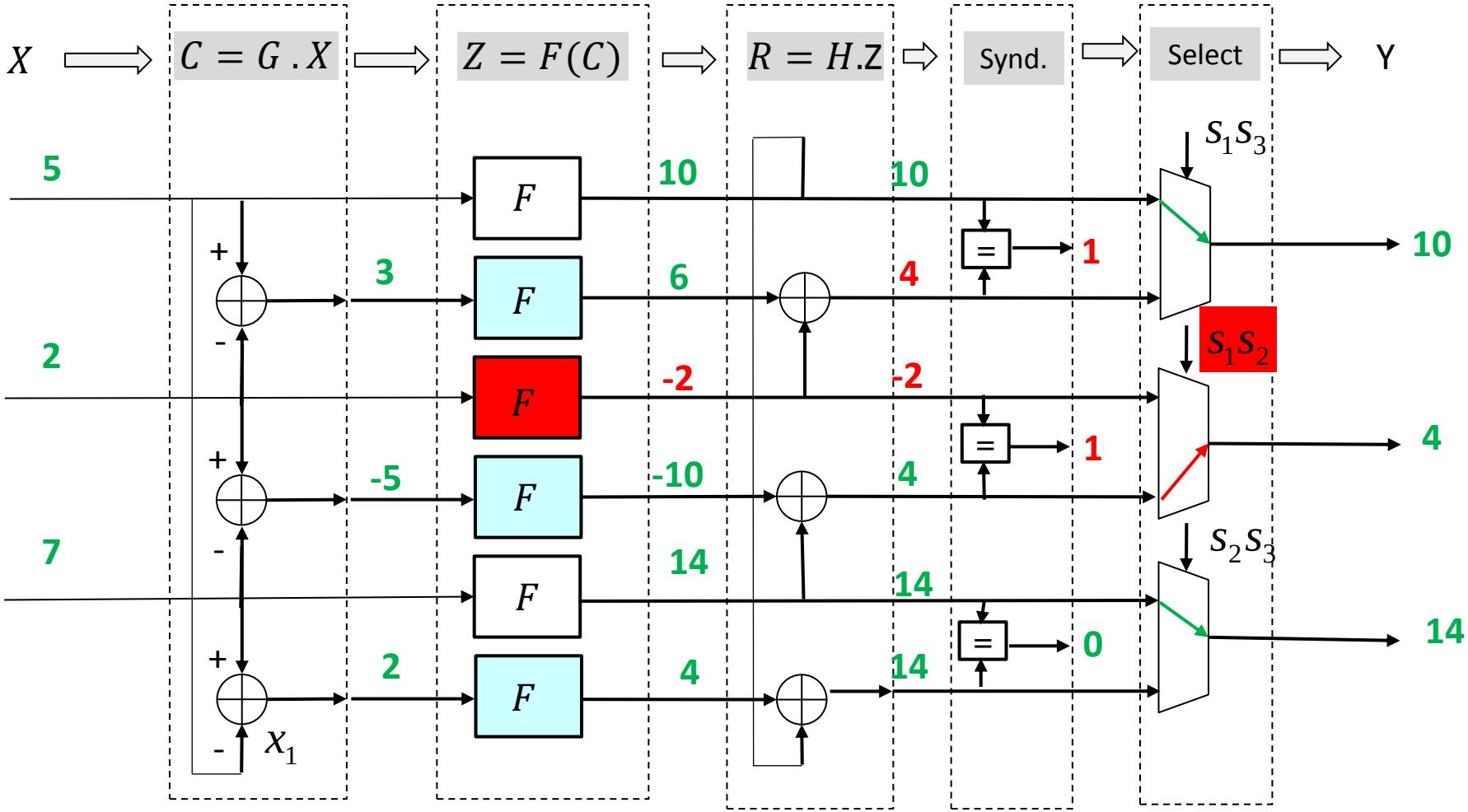
# Duplication with Syndrome based Correction (DSC)



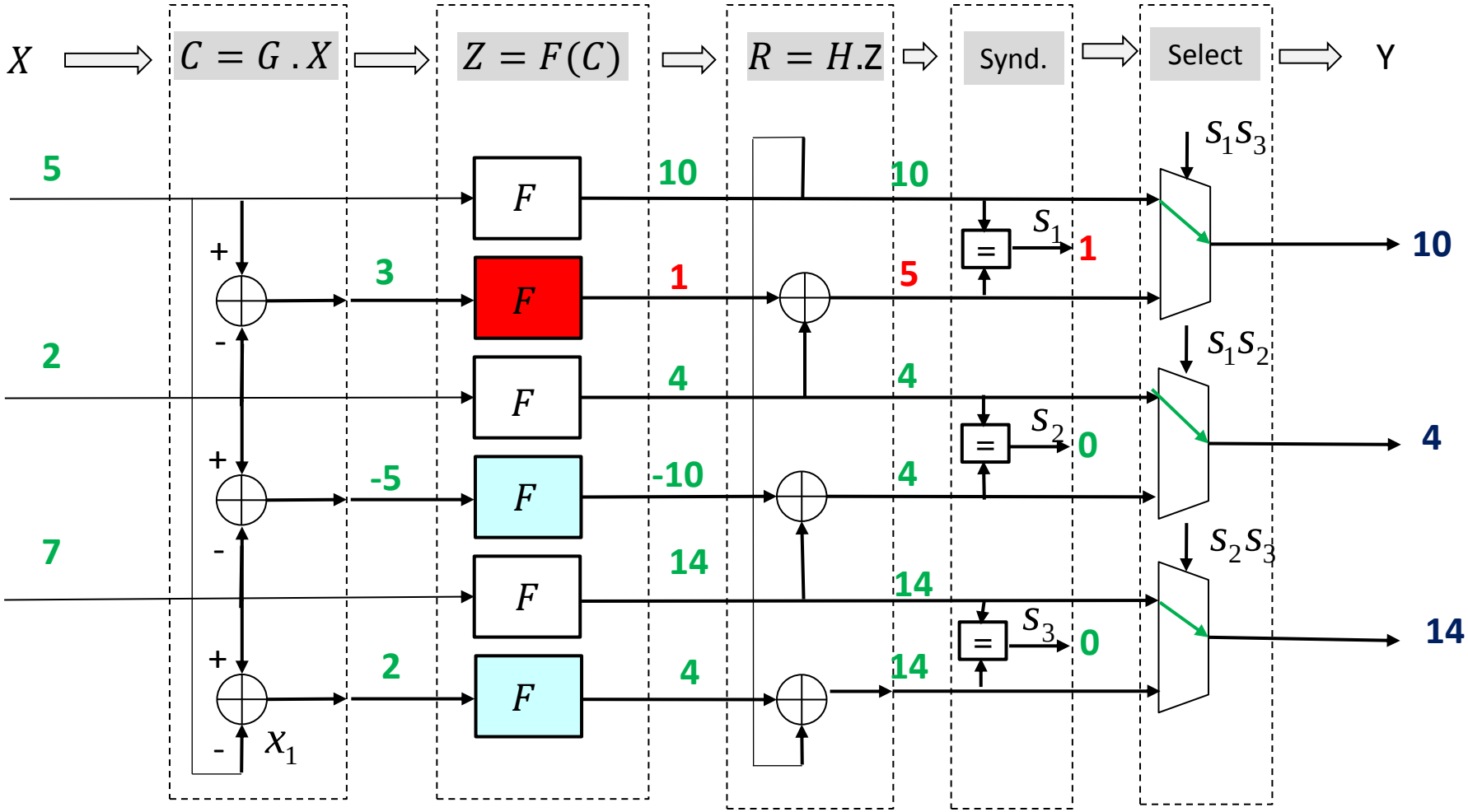
# Exemple F(x) = 2.x



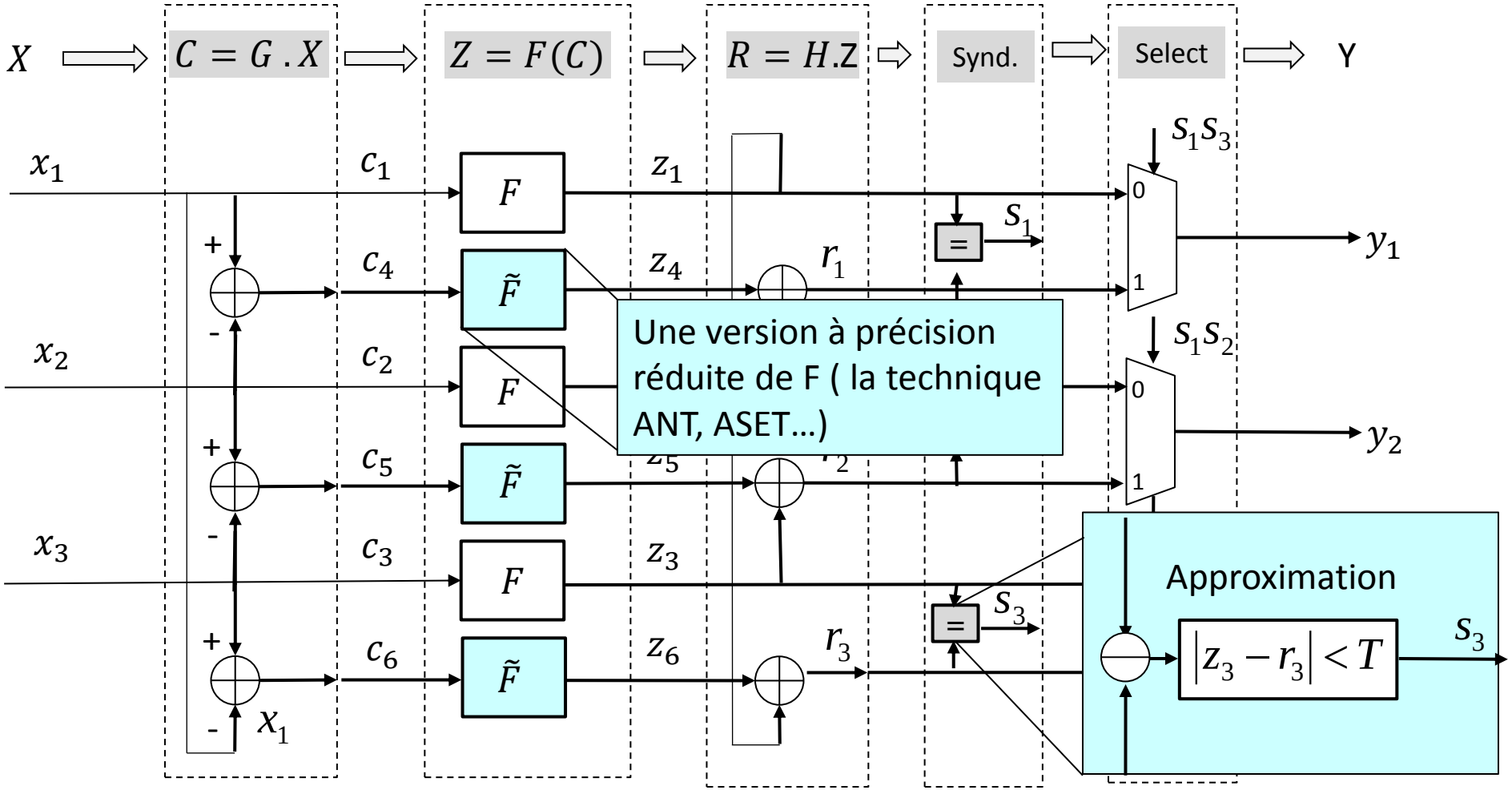
# Exemple F(x) = 2.x



# Exemple F(x) = 2.x



# Généralisation (1) : Application de la technique ANT sur DSC



# Généralisation

$X \Longrightarrow C = G\,.X \Longrightarrow Z = F(C) \Longrightarrow R = H.Z \Rightarrow$ Synd. $\Longrightarrow$ Select $\Longrightarrow$ Y

Matrice génératrice

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrice de reconstruction

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R = HZ = HF(GX) = HG(F(X)) = F(X) = Y$$

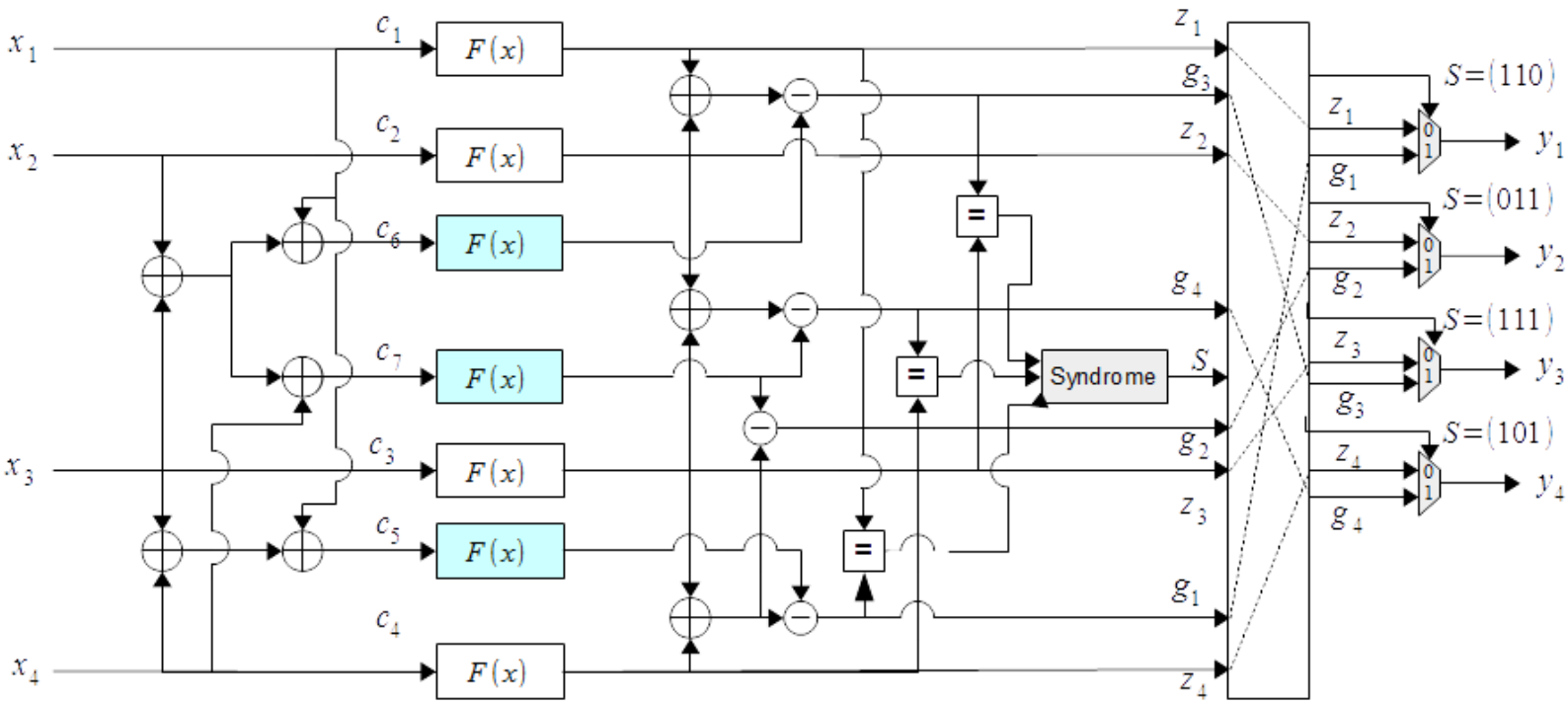
- La technique DSC peut être appliquée sur des systèmes avec plus que 3 entrées.
- Les codes correcteurs d'erreurs peuvent être introduits dans ces architectures.

  => Fault Tolerant based Error Correction Code (FT-ECC) scheme

# Exemple: FT-Hamming

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} -1 & 0 & -1 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



# Plan de la présentation

1. *Tolérance aux fautes pour des applications de TNS.*

2. *Robustesse d'un canal de poursuite GPS.*
   a. *La poursuite des signaux GPS.*
   b. *Sensibilité d'un canal de poursuite GPS aux fautes.*
   c. *Application du DSC pour protéger la fonction de corrélation.*
   d. *Protection de la fonction de l'estimation de la porteuse.*

3. *Plateforme d'expérimentation et de mesures.*

*Conclusion et perspectives.*

# Le Récepteur GPS

- **<u>Système GPS:</u>** Constellation de 32 satellites GPS + Station de contrôle de la constellation + Récepteur GPS pour le calcul de la position.

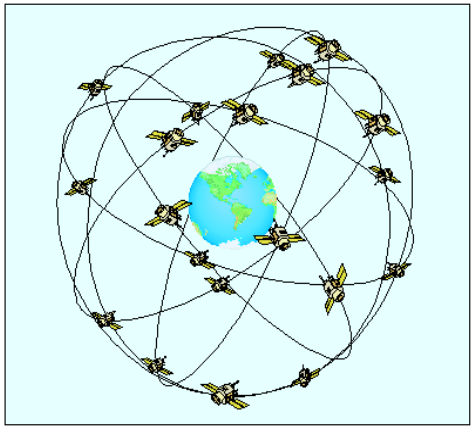
- **<u>Signal émis par les satellites</u>**

$$e(t) = d(t)c(t)e^{i2\pi f_{L1} t}$$

message de navigation (50 Hz) $d(t) \in \{-1,1\}$

Code du satellite GPS (1.023 MHz) $c(t) \in \{-1,1\}$

Fréquence de la porteuse



- **<u>Signal à l'antenne d'un récepteur GPS:</u>**

$$s(t) = \sum_{k \in \{1 \dots K\}} A_k(t) d_k(t - \tau_k(t)) c_k(t - \tau_k(t)) e^{i2\pi t (f_I + f_{d(k)}(t))}$$

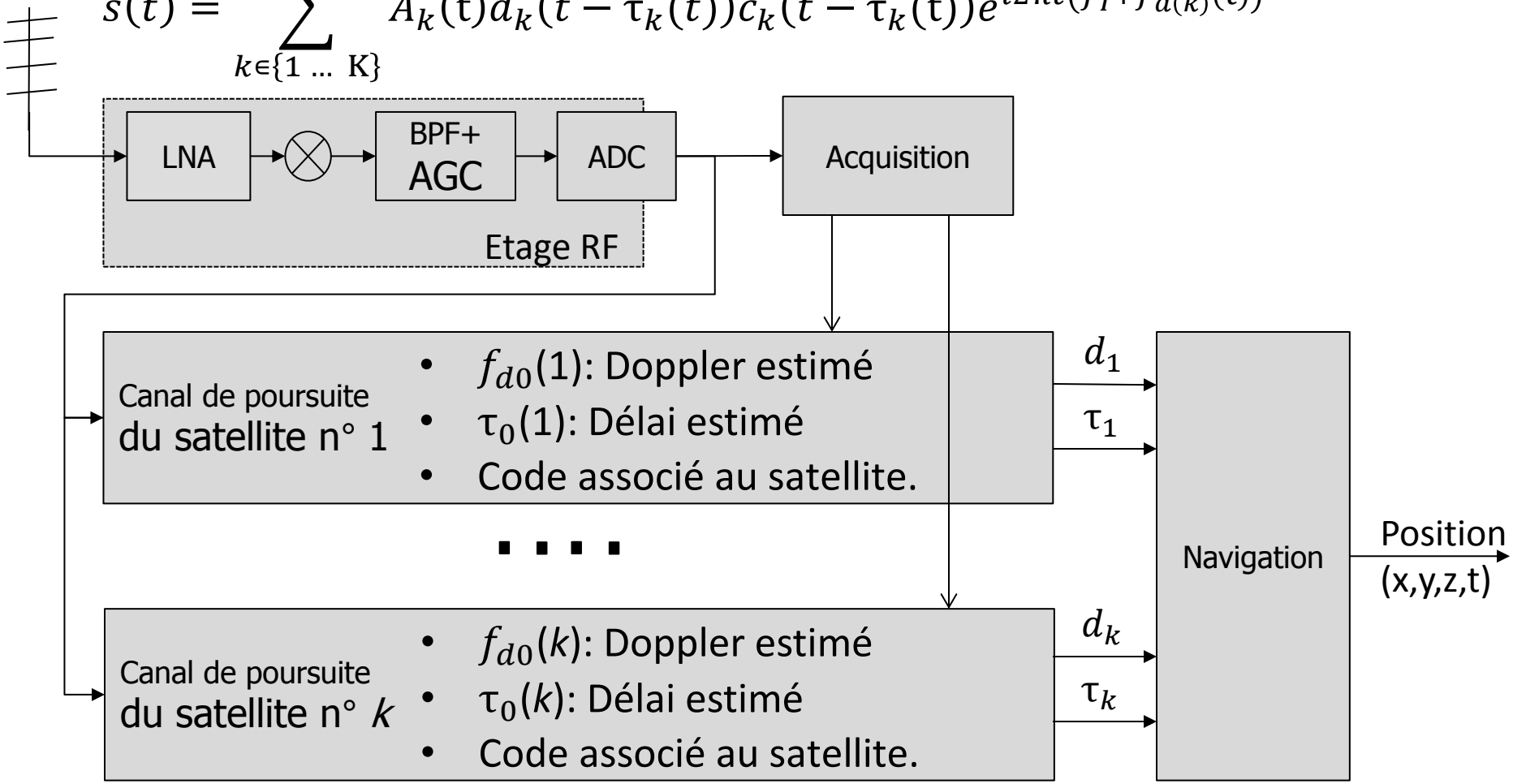
# Principe de la poursuite d'un signal GPS

- **<u>Le traitement du signal émis par un satellite permet de :</u>**
  - ✓ déterminer "le temps de vol $\tau(t)$" (i.e. distance satellite-récepteur),
  - ✓ déterminer l'effet de Doppler $f_d(t)$ dû aux déplacements satellites et récepteur,
  - ✓ décoder le message de navigation d(t).

- **<u>Localisation dans un récepteur GPS:</u>**
  - ✓ <u>Phase d'acquisition:</u> 1) Identifications des différents satellites GPS en vu,
    2) estimation grossière du $\tau(t)$ et du $f_d(t)$.
  - ✓ <u>Phase de poursuite:</u> estimation fine de $\tau(t)$ et du $f_d(t)$; suivi permanent de leur évolutions.
  - ✓ <u>Phase de navigation:</u> calcul de la position à partir des temps de vol.

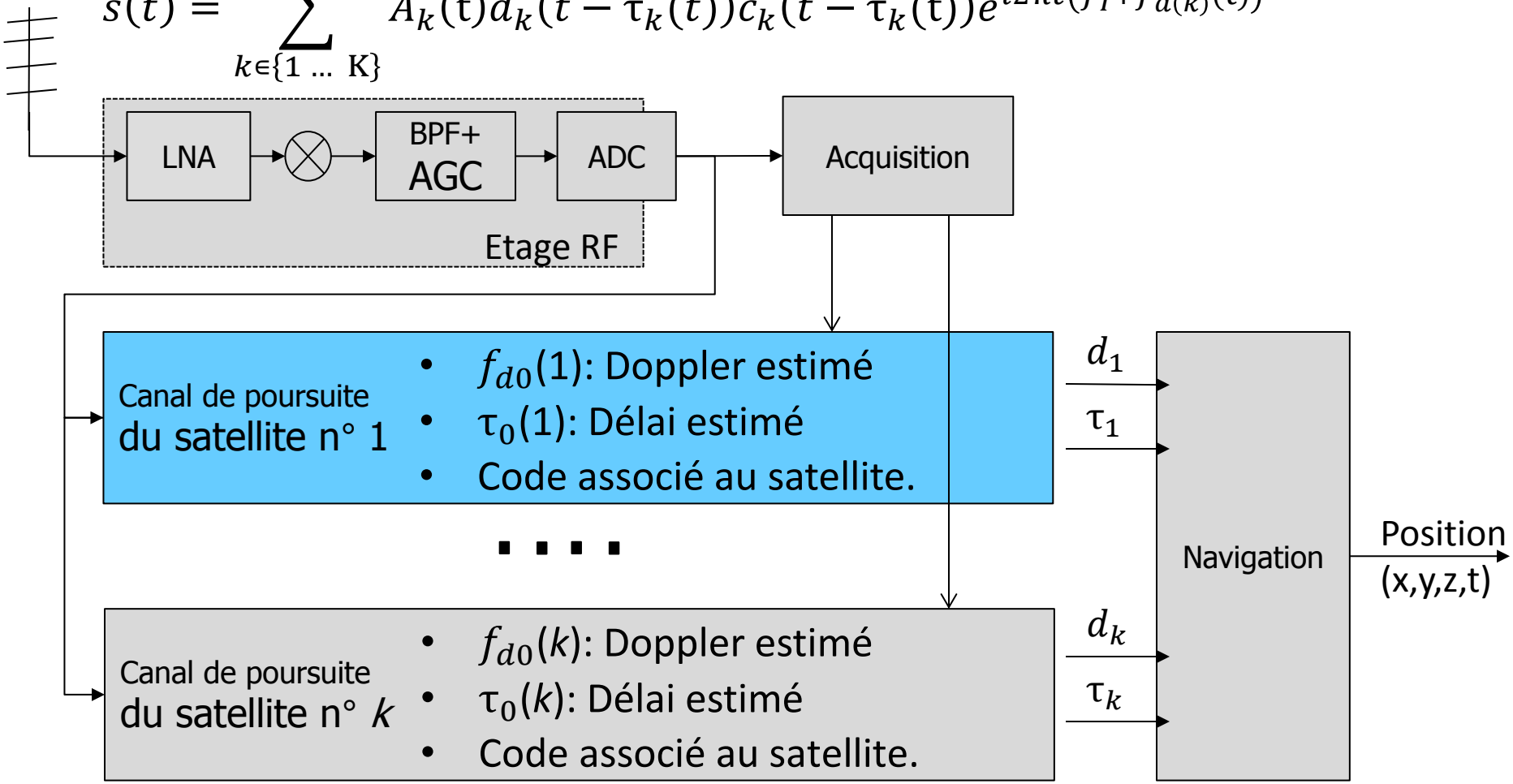
# Principe de la poursuite d'un signal GPS

$$s(t) = \sum_{k \in \{1 \dots K\}} A_k(\mathrm{t}) d_k(t - \tau_k(t)) c_k(t - \tau_k(\mathrm{t})) e^{i2\pi t(f_I + f_{d(k)}(\mathrm{t}))}$$



# Principe de la poursuite d'un signal GPS

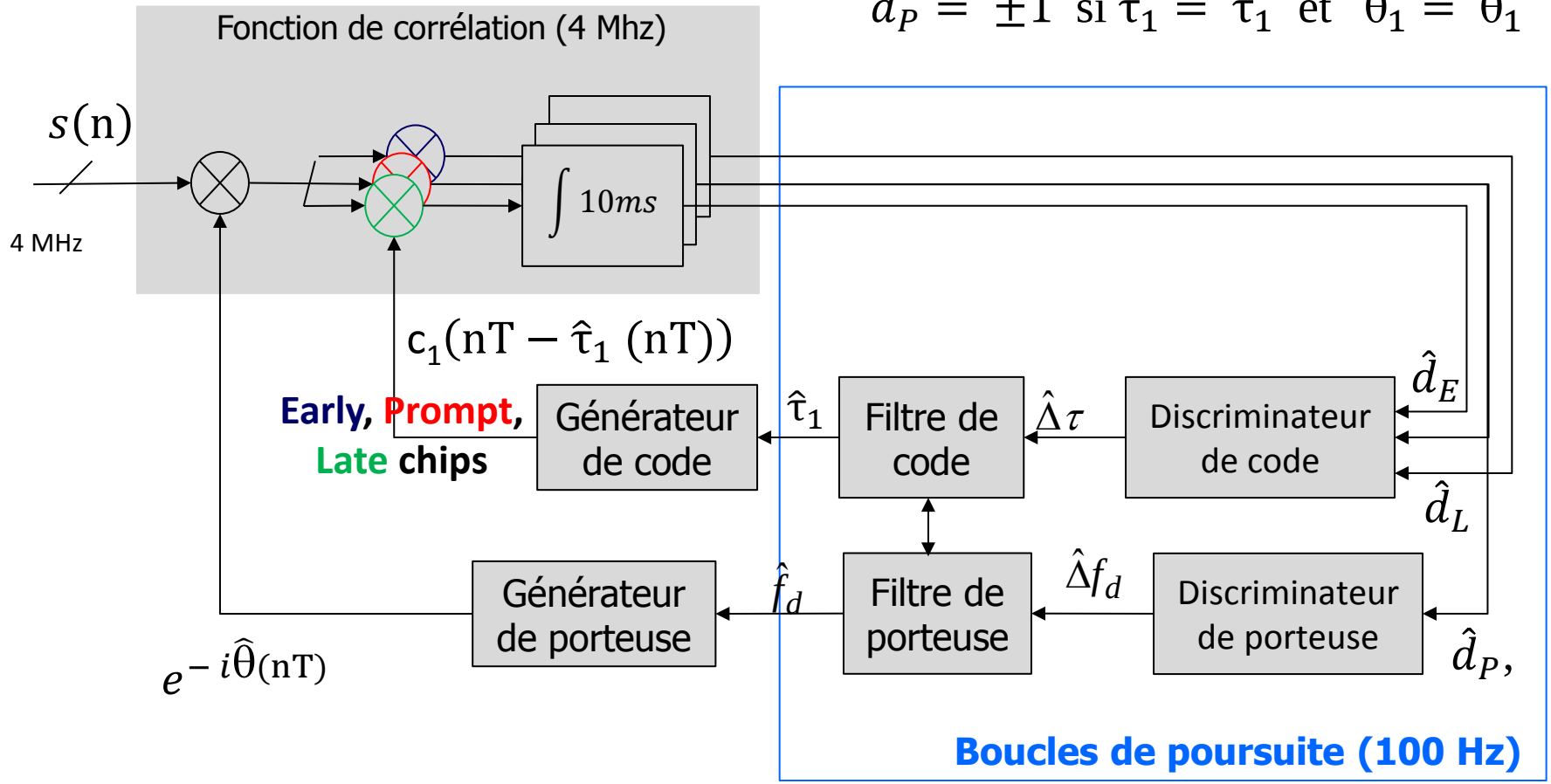
$$s(t) = \sum_{k \in \{1 \dots K\}} A_k(\mathrm{t}) d_k(t - \tau_k(t)) c_k(t - \tau_k(\mathrm{t})) e^{i2\pi t(f_I + f_{d(k)}(\mathrm{t}))}$$



# Architecture d'un canal de poursuite

$$s(\mathrm{n}) \approx \pm c_1(\mathrm{nT} - \tau_1(\mathrm{nT}))e^{i\,\theta_1(\mathrm{nT})} + \mathrm{IIS} + \mathrm{noise}$$

$$\hat{d}_P = \pm 1 \text{ si } \hat{\tau}_1 = \tau_1 \text{ et } \hat{\theta}_1 = \theta_1$$



# Plan de la présentation

1. *Tolérance aux fautes pour des applications de TNS.*

2. *Robustesse d'un canal de poursuite GPS.*
   a. *La poursuite des signaux GPS.*
   b. *Sensibilité d'un canal de poursuite GPS aux fautes.*
   c. *Application du DSC pour protéger la fonction de corrélation.*
   d. *Protection de la fonction de l'estimation de la porteuse.*

3. *Plateforme d'expérimentation et de mesures.*

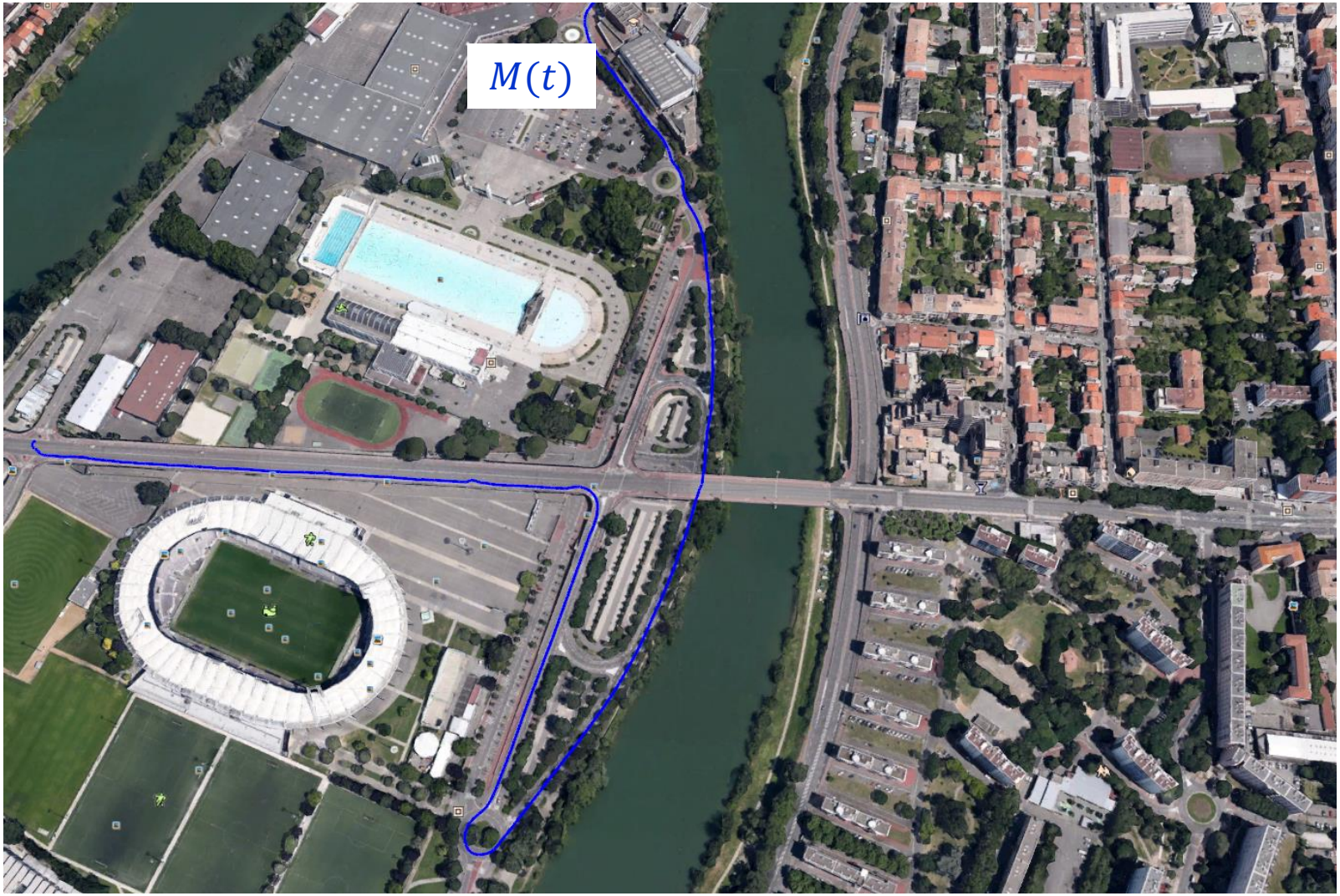
*Conclusion et perspectives.*

# Sensibilité de l'architecture aux erreurs

- **<u>Objectif:</u>** Identifier les éléments de l'architecture les plus sensibles aux erreurs
- **<u>Méthodologie:</u>**

Enregistrement des signaux numériques des satellites GPS → Code standard en Matlab de la phase de poursuite → Position de référence M(t)

# Trajectoire de référence



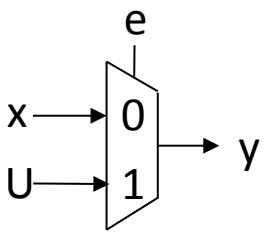
# Sensibilité de l'architecture aux erreurs

- **Objectif:** Identifier les éléments de l'architecture les plus sensibles aux erreurs
- **Méthodologie:**

Enregistrement des signaux numériques des satellites GPS → Code standard en Matlab de la phase de poursuite → Position de référence M(t)

Enregistrement des signaux numériques des satellites GPS → Ajout du bruit à la sortie des modules à tester → Position bruité $M_p(t)$

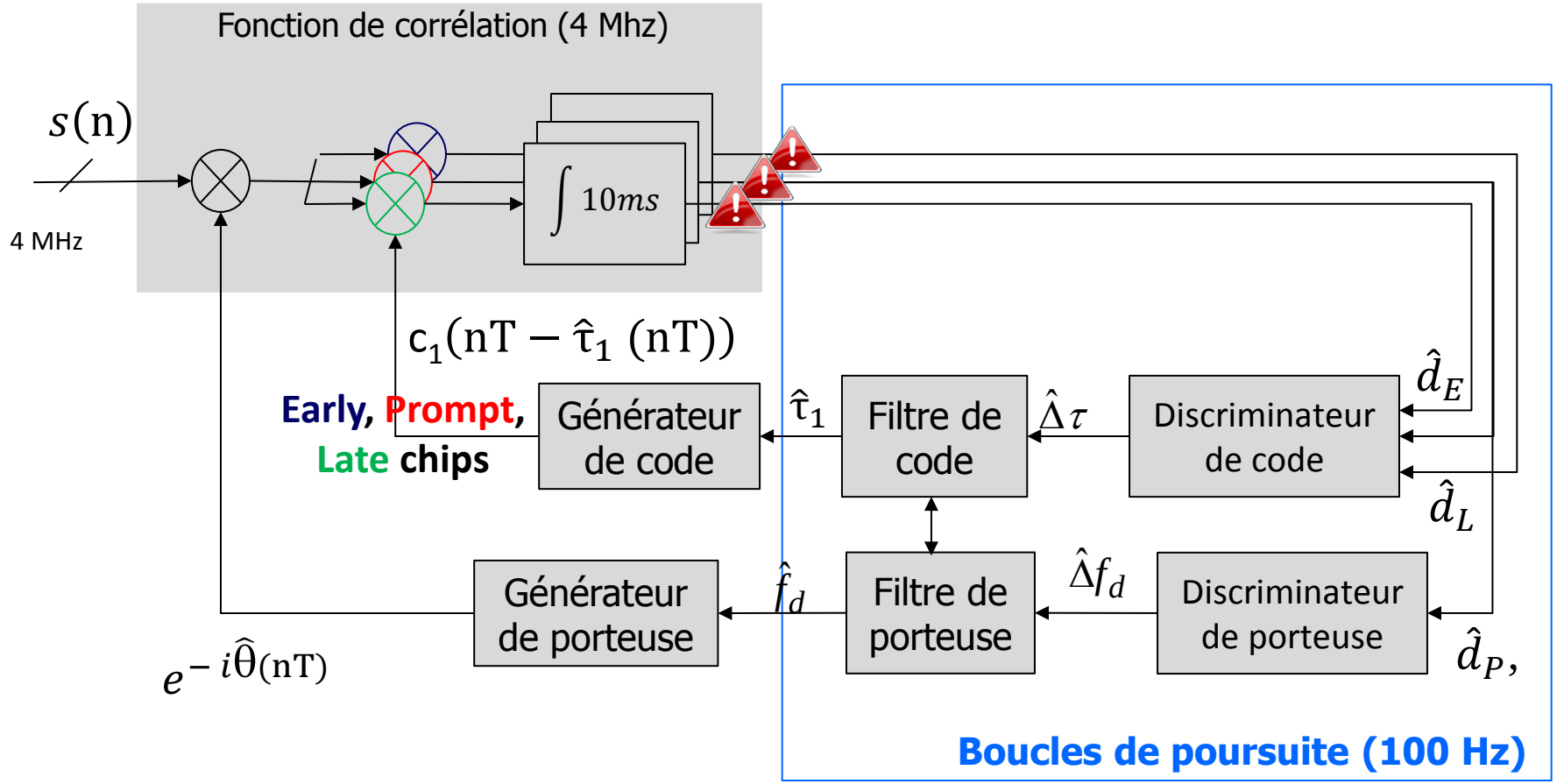
- **Model du bruit:**



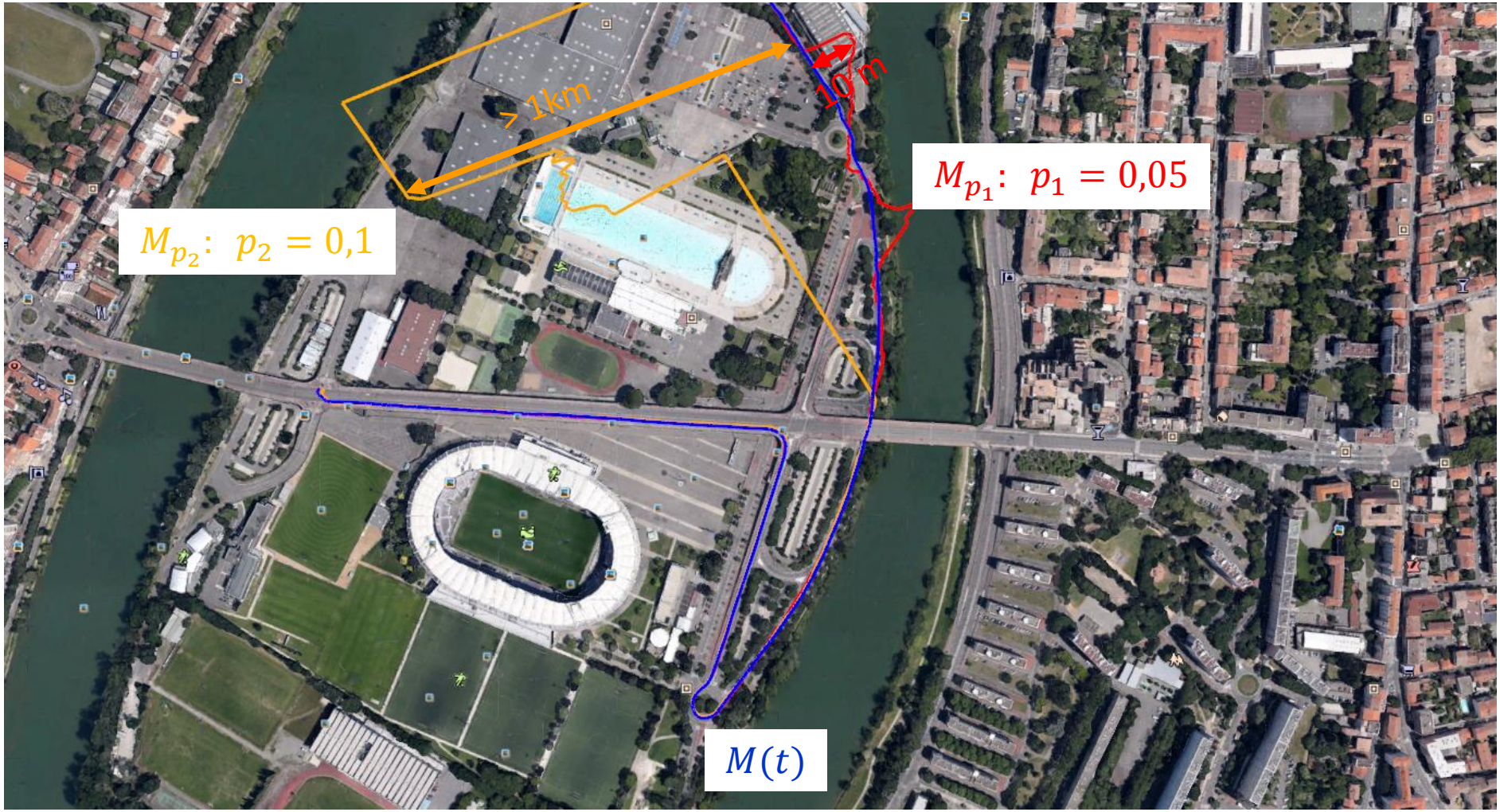

Prob (e=1)=p

U: Bruit uniforme sur D(x)

# Exemple: Erreurs à la sortie du produit de corrélation



# Trajectoires bruitées



# Sensibilité de l'architecture aux erreurs

- **Objectif:** Identifier les éléments de l'architecture les plus sensibles aux erreurs
- **Méthodologie:**

Enregistrement des signaux numériques des satellites GPS → Code standard en Matlab de la phase de poursuite → Position de référence M(t)

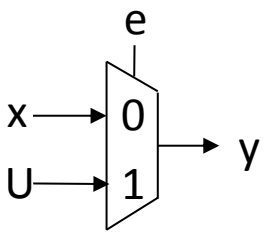
Enregistrement des signaux numériques des satellites GPS → Ajout du bruit à la sortie des modules à tester → Position bruité $M_p(t)$

$E(t) = M(t)-M_p(t)$

$\sigma_E = F(p)$

$Pr(E < d) = F(d)$

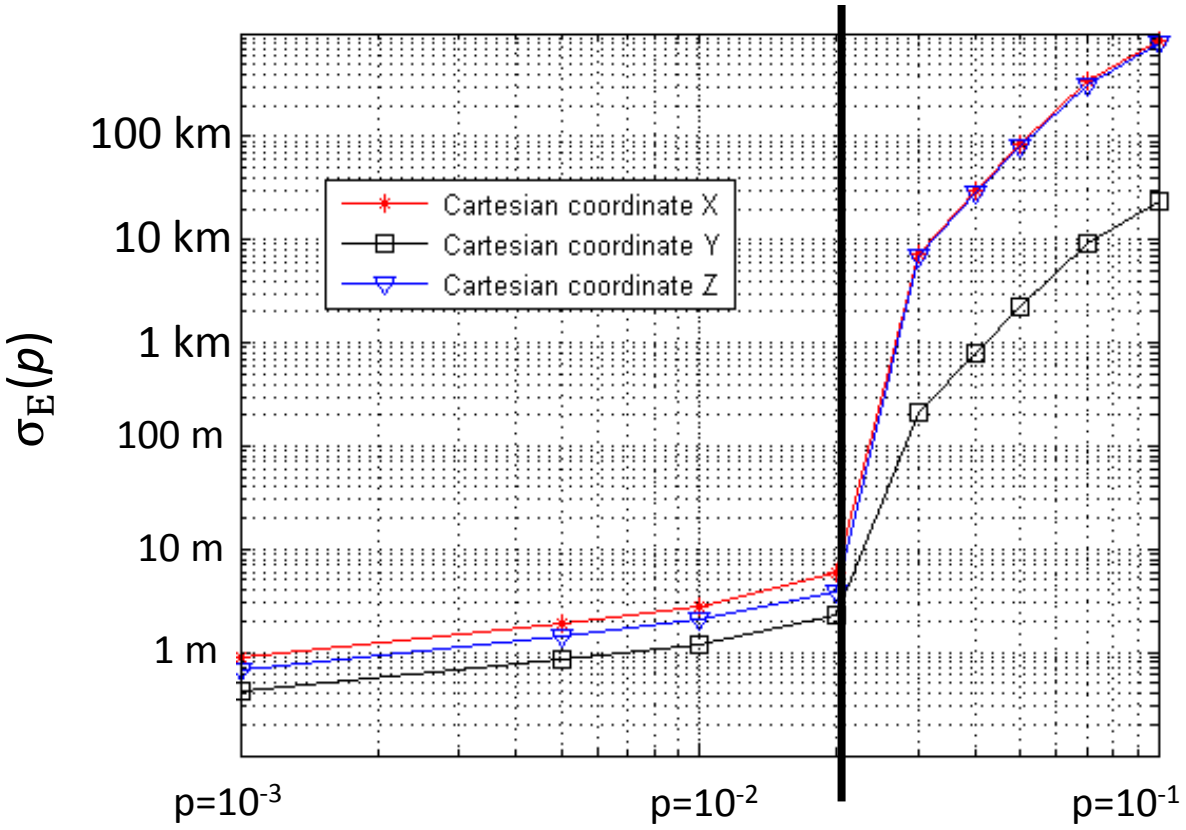
- **Model du bruit:**




Prob (e=1)=p

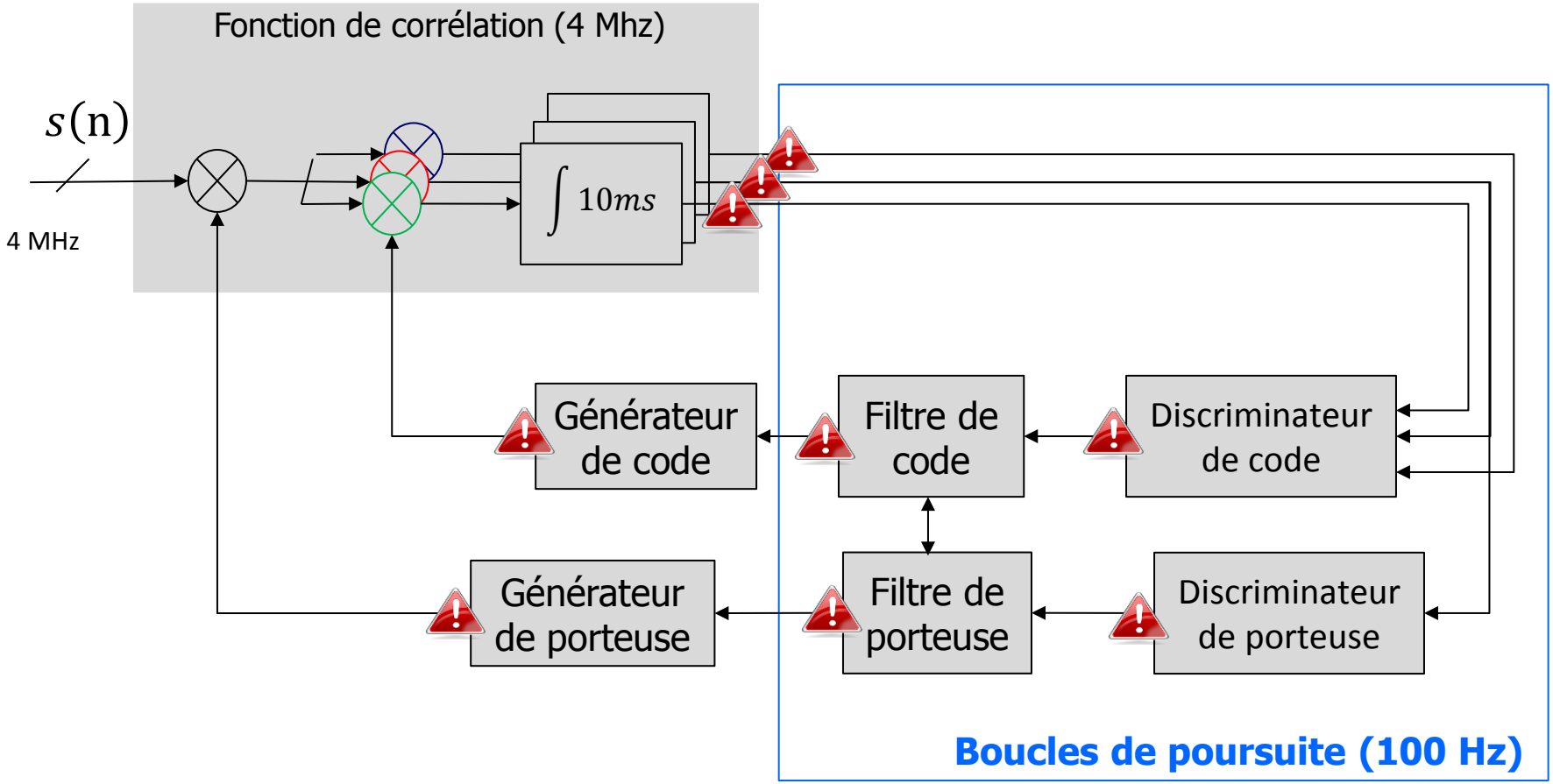
U: Bruit uniforme dans $D_x$

# Ecart type entre M(t) et $M_p(t)$ avec corrélateurs bruités

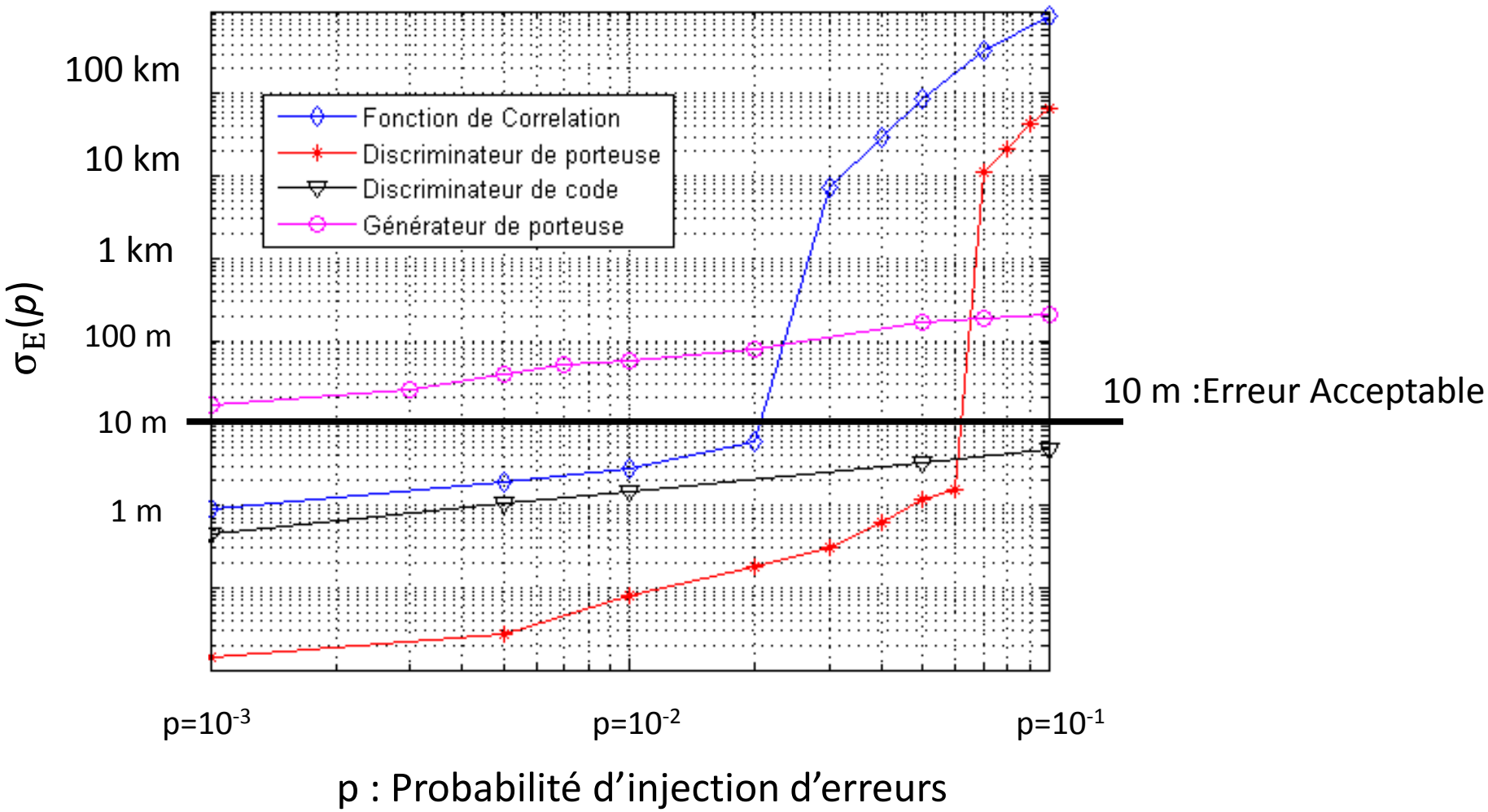



p : Probabilité d'injection d'erreurs

# Sensibilité de l'architecture aux erreurs



# Comparaison $\sigma_E$ = F(p)



# Plan de la présentation

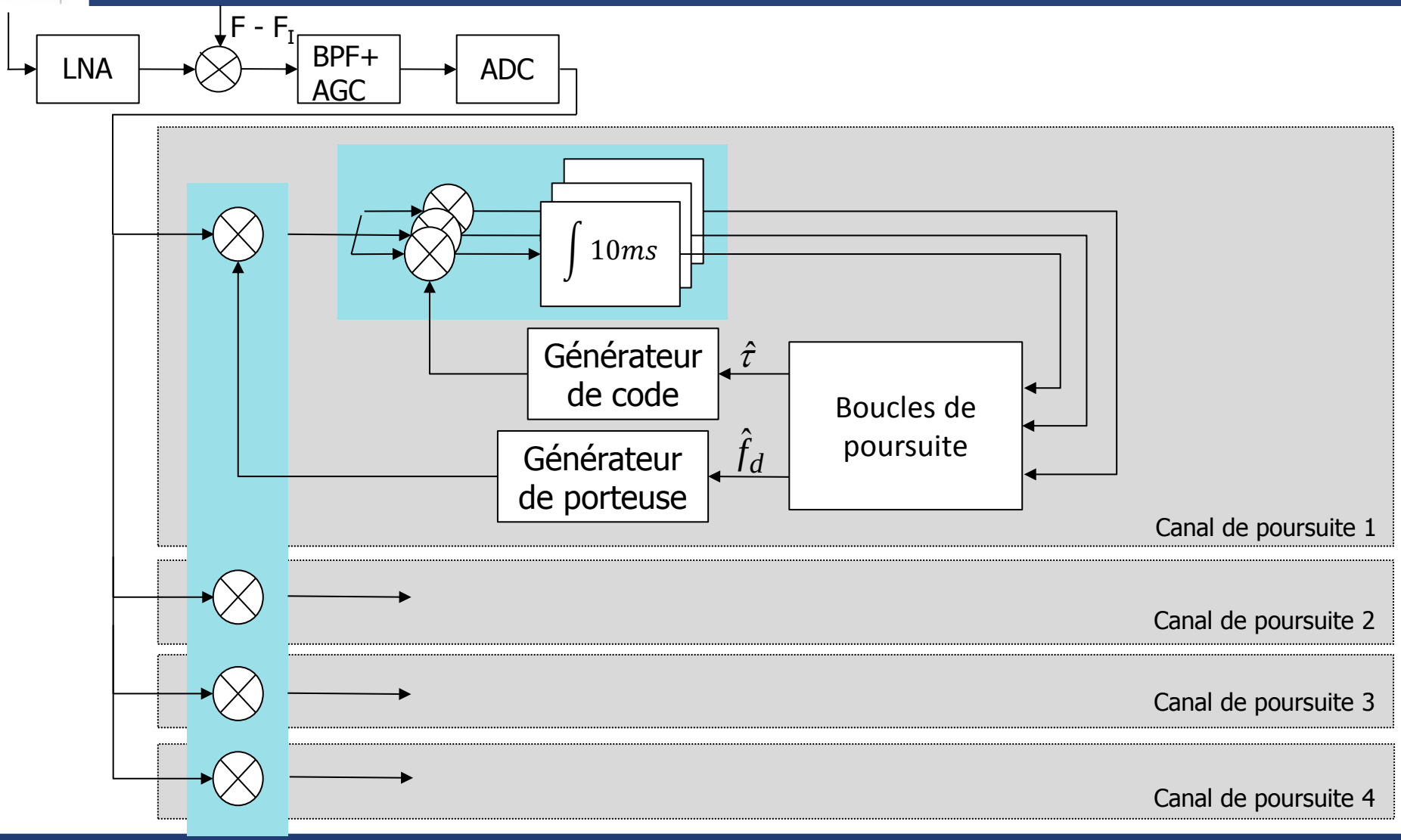
1. *Tolérance aux fautes pour des applications de TNS.*

2. *Robustesse d'un canal de poursuite GPS.*
   a. *La poursuite des signaux GPS.*
   b. *Sensibilité d'un canal de poursuite GPS aux fautes.*
   c. *Application du DSC pour protéger la fonction de corrélation.*
   d. *Protection de la fonction de l'estimation de la porteuse.*

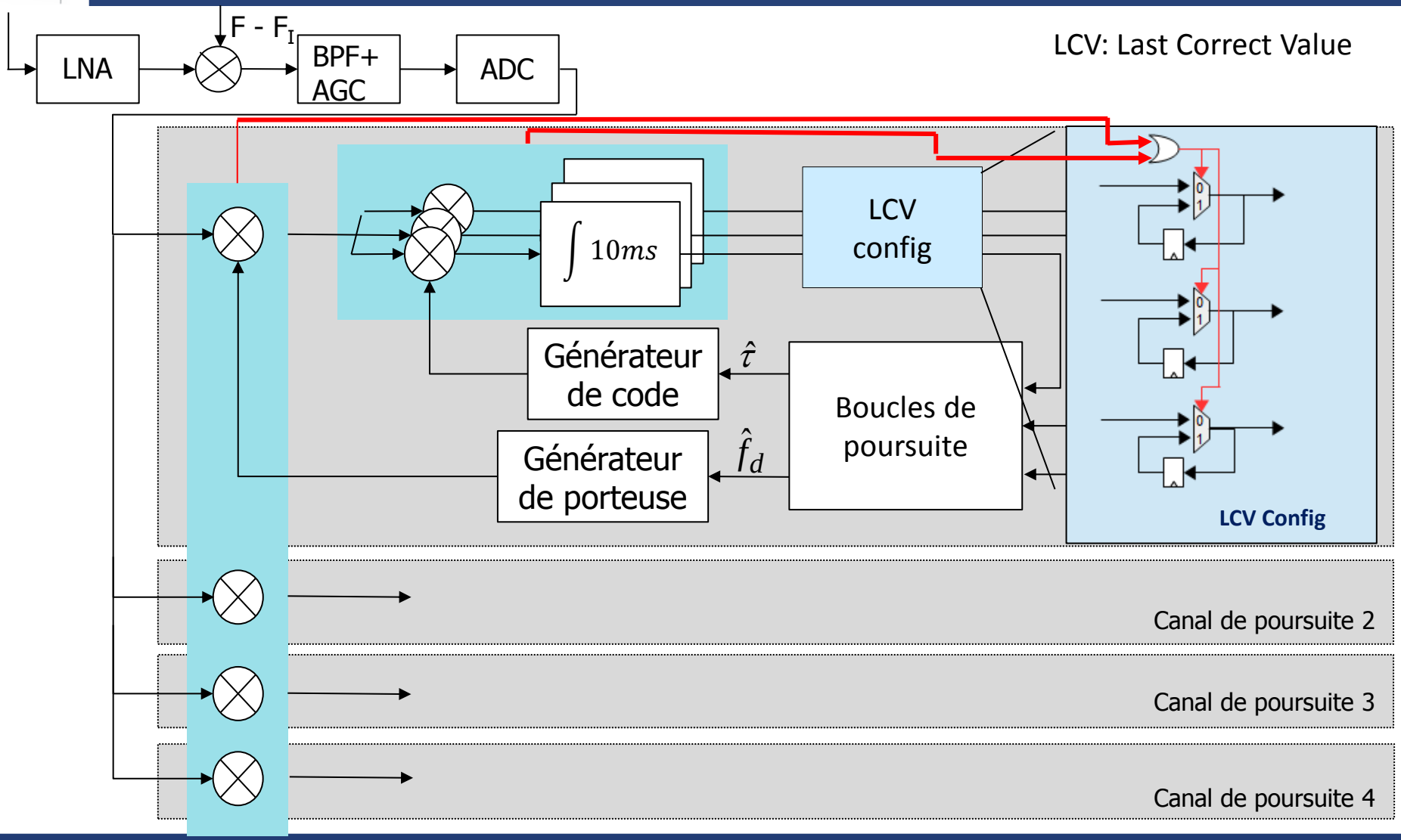
3. *Plateforme d'expérimentation et de mesures.*

*Conclusion et perspectives.*

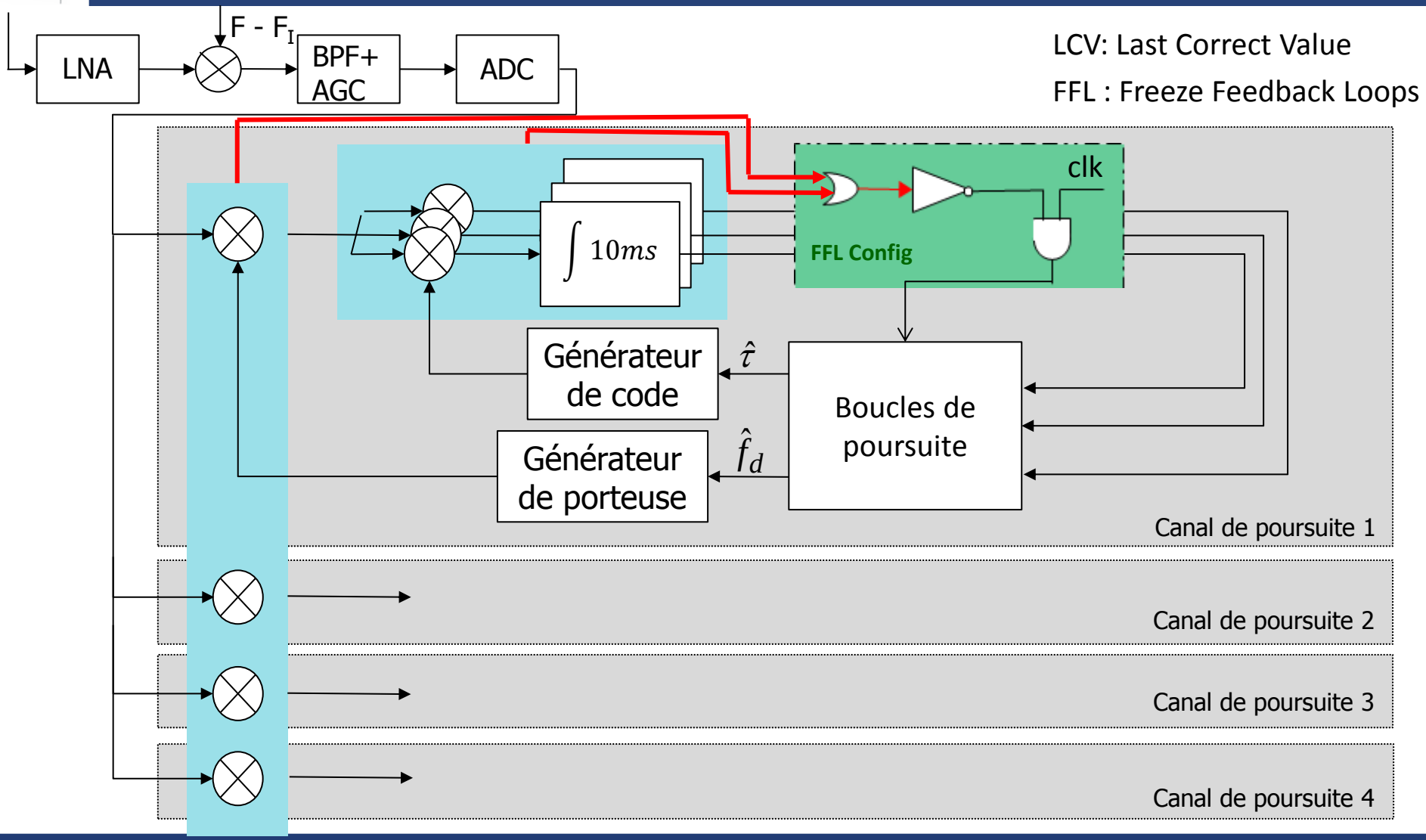
# Application du DSC pour protéger le calcul de la corrélation



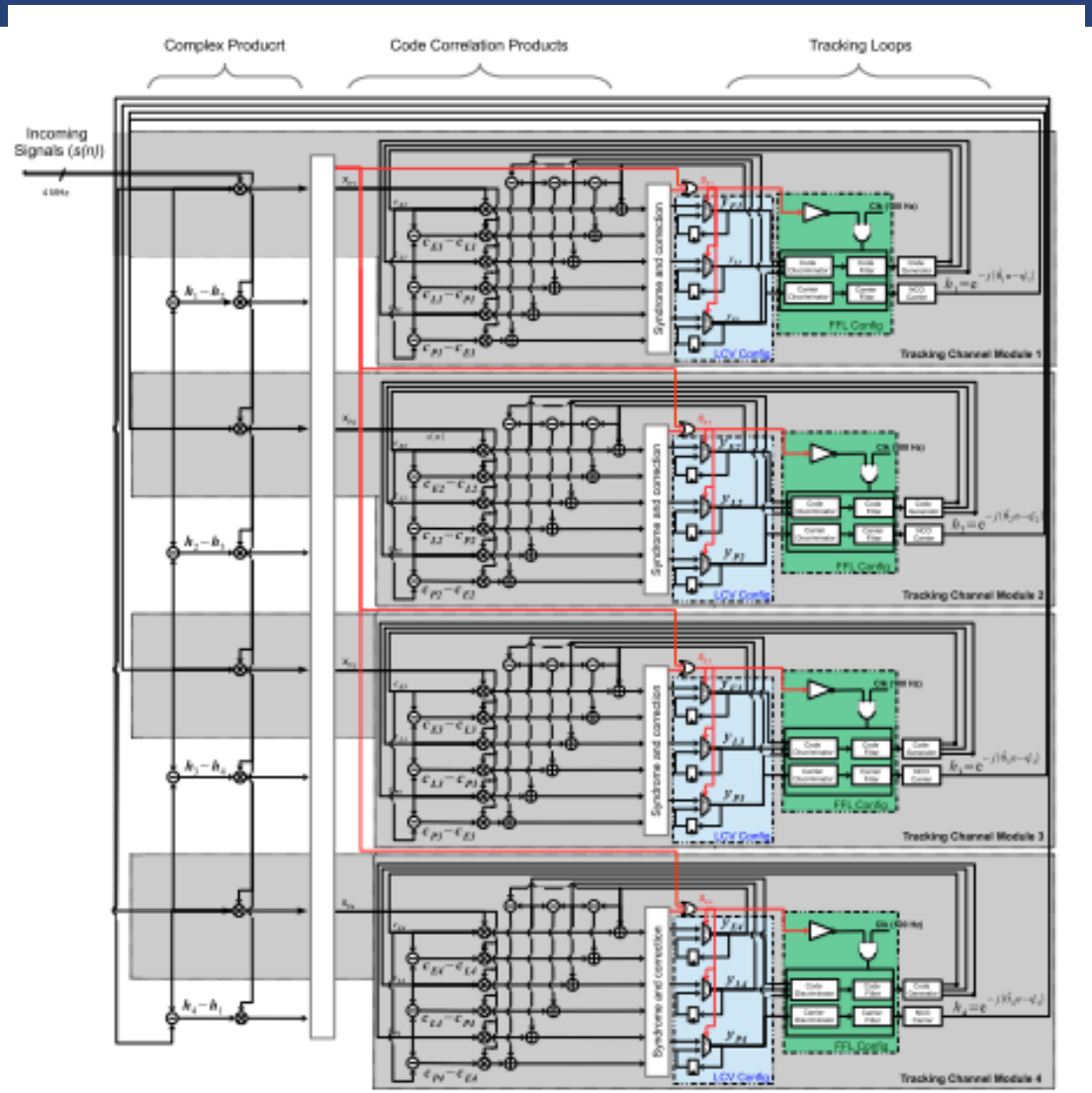
# Application du DSC pour protéger le calcul de la corrélation



# Application du DSC pour protéger le calcul de la corrélation

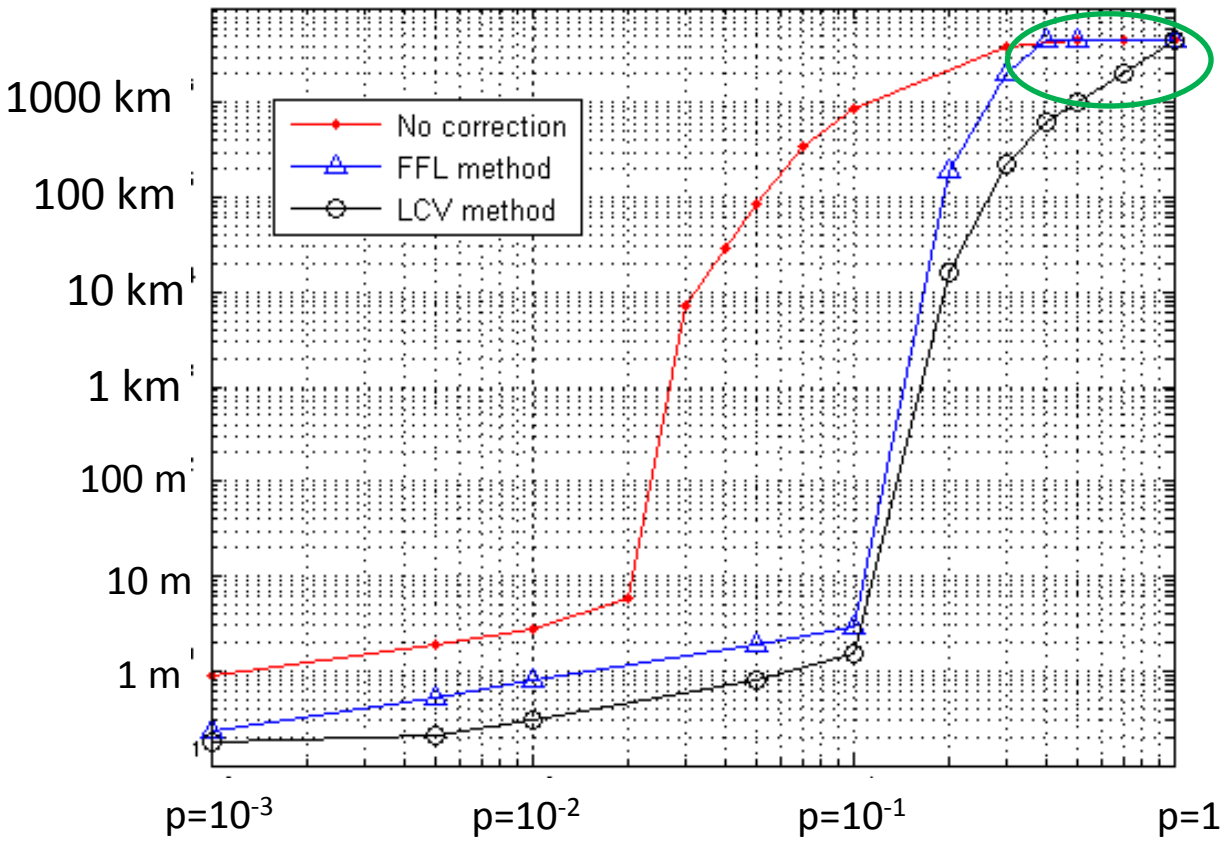


# Combinaison de DSC et LCV ou FFL



# $\log(\sigma_E) = F(p)$

Les boucles de poursuite ne convergent pas.



# Plan de la présentation

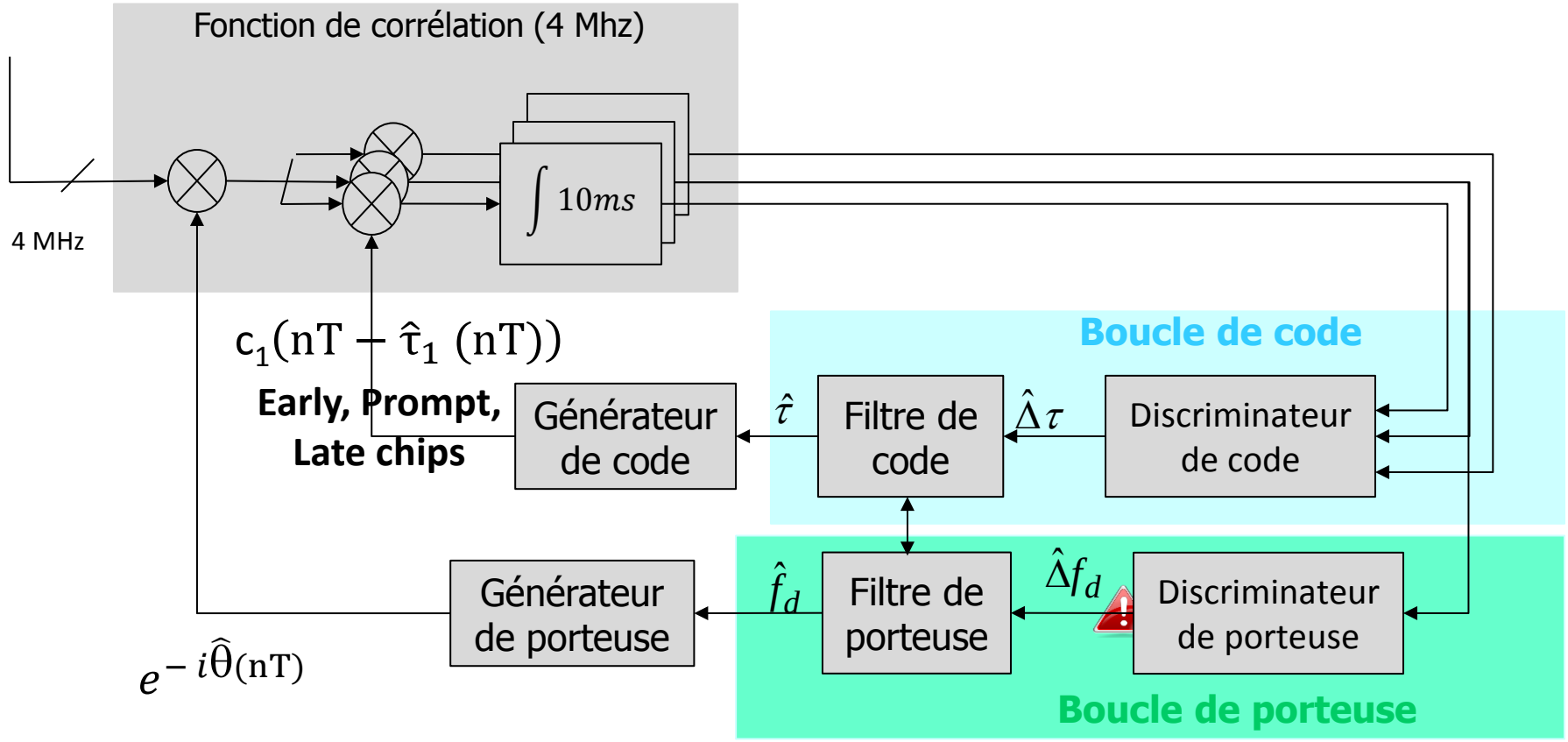
1. *Tolérance aux fautes pour des applications de TNS.*

2. *Robustesse d'un canal de poursuite GPS.*
   a. *La poursuite des signaux GPS.*
   b. *Sensibilité d'un canal de poursuite GPS aux fautes.*
   c. *Application du DSC pour protéger la fonction de corrélation.*
   d. *Protection de la fonction de l'estimation de la porteuse.*

3. *Plateforme d'expérimentation et de mesures.*

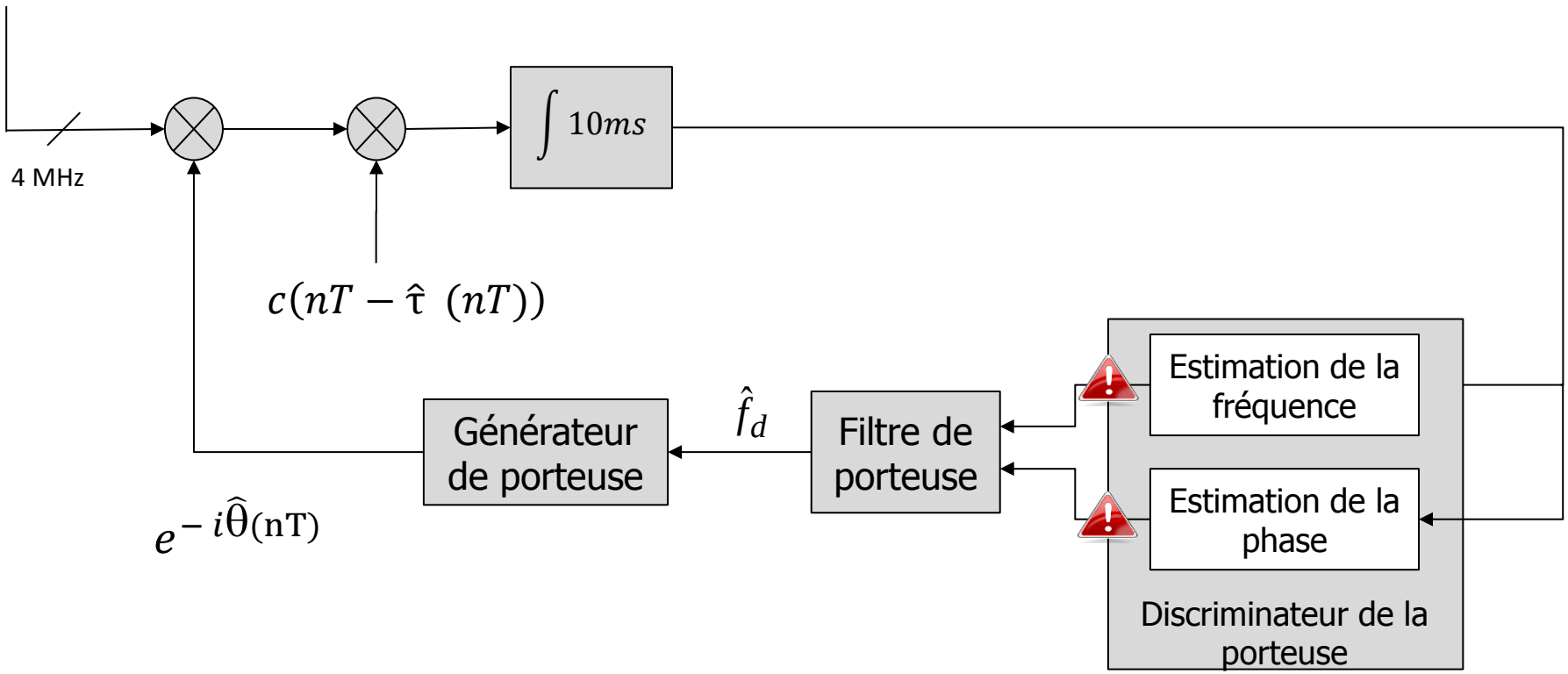
*Conclusion et perspectives.*

# Exemple: Erreurs à la sortie du produit de corrélation

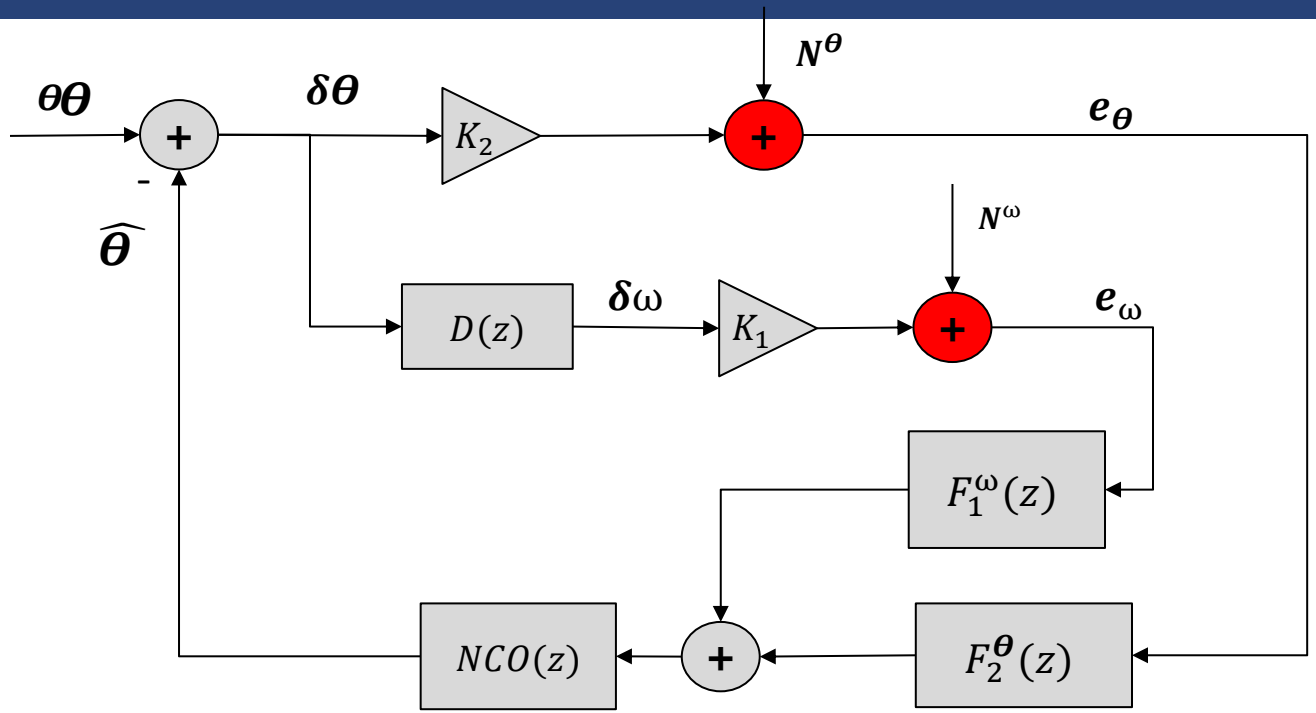


# Boucle de porteuse

- Deux paramètres pour caractériser la porteuse : La fréquence et la phase



# Modèle linéaire de la boucle de porteuse




- $\boldsymbol{\theta}$ : la phase de la porteuse
- $\omega$ : la fréquence de la porteuse
- NCO(z): fonction de transfert du NCO
- D(z): fonction de transfert du l'estimateur de de la fréquence
- $K_2$: Gain de l'estimateur de phase
- $K_1$: Gain de l'estimateur de fréquence
- $F_1^{\omega}(z)$ : fonction de transfert de partie fréquentielle du FPLL
- $F_1^{\omega}(z)$ : fonction de transfert de partie phase du FPLL

# Modèle linéaire de la boucle de porteuse

- Fonction de transfert entre le bruit et l'erreur de poursuite $\boldsymbol{\delta}\Omega$ :

$$H_n^{\omega} = \frac{\boldsymbol{\delta}\omega}{\boldsymbol{N}^{\omega}} = \frac{NCO(z)F_1^{\omega}(z)}{1 + NCO(z)F_1^{\omega}(z)K_1\mathrm{D(z)} + NCO(z)F_2^{\omega}(z)K_2}$$

- Densité spectrale du bruit $\boldsymbol{N}^{\omega}$ :

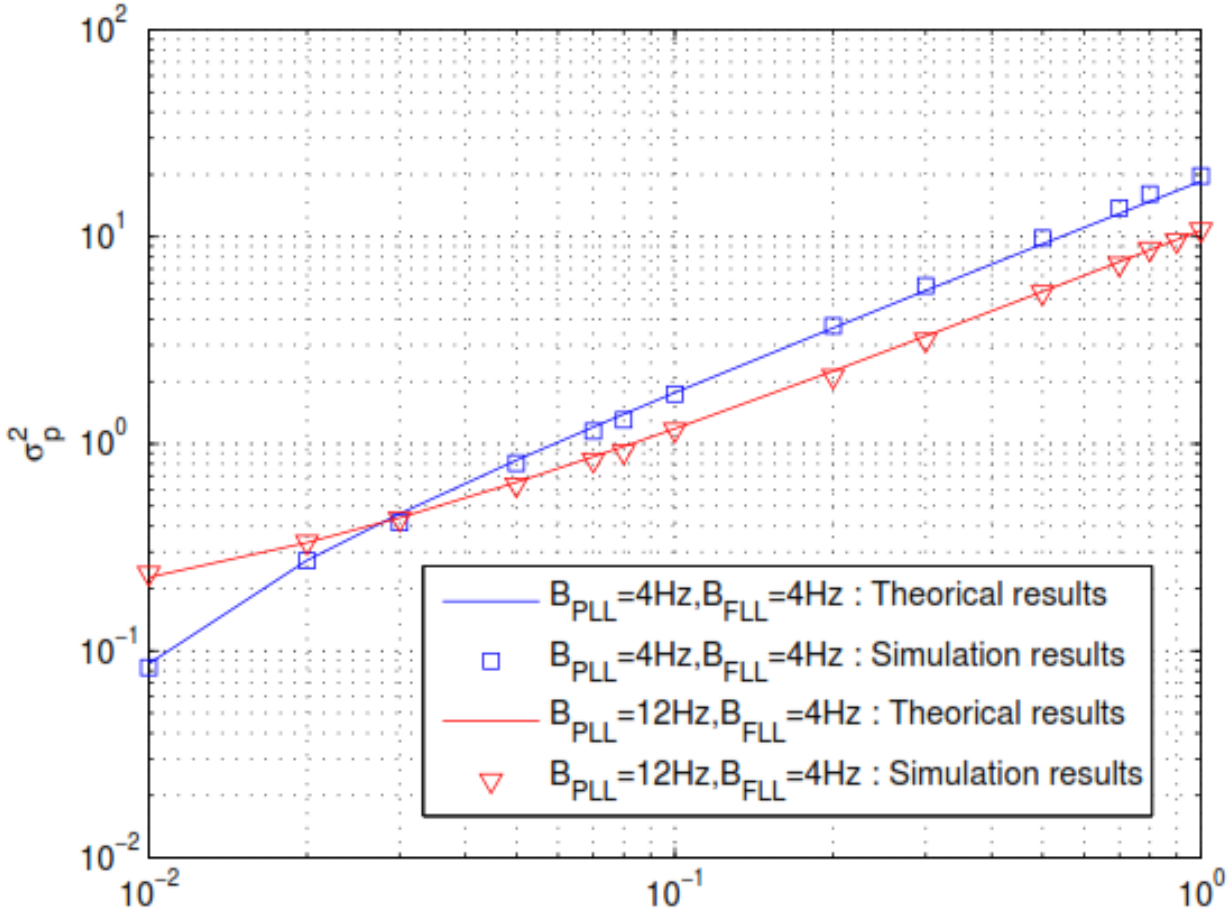
$$S_n^{\omega} = (2b+1)(b+1)\frac{p}{6}$$ où $\boldsymbol{N}^{\omega}$ est un bruit uniforme sur [-b,b]

- La variance de l'erreur sur la poursuite :

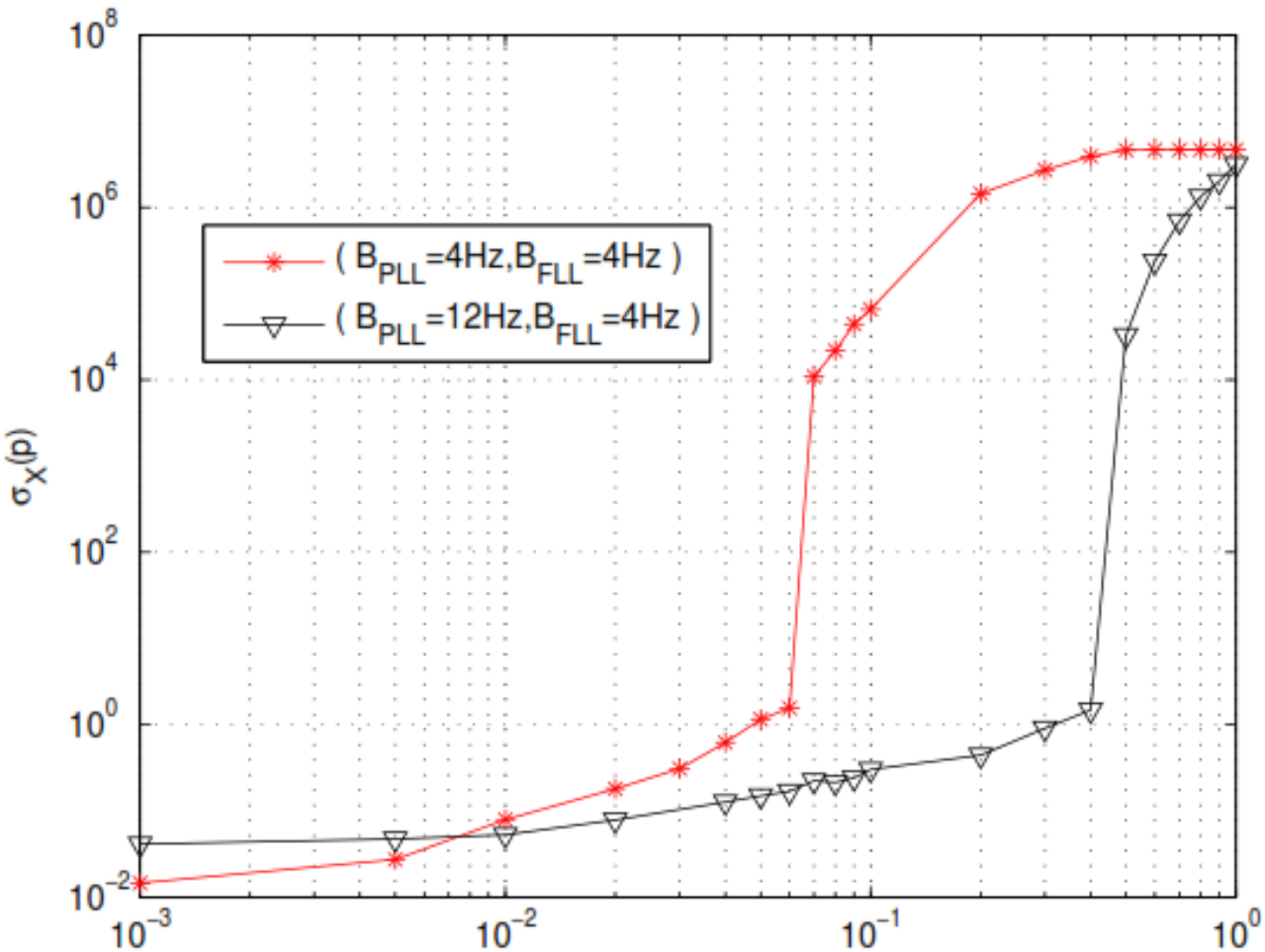
$$\boxed{\sigma^2_{\boldsymbol{\delta}\omega} = \frac{1}{2\pi T}\int_{-\pi}^{\pi} S_n^{\omega}(w)|H_n^{\omega}(w)|dw}$$

# $\sigma_p^2$=f(p)

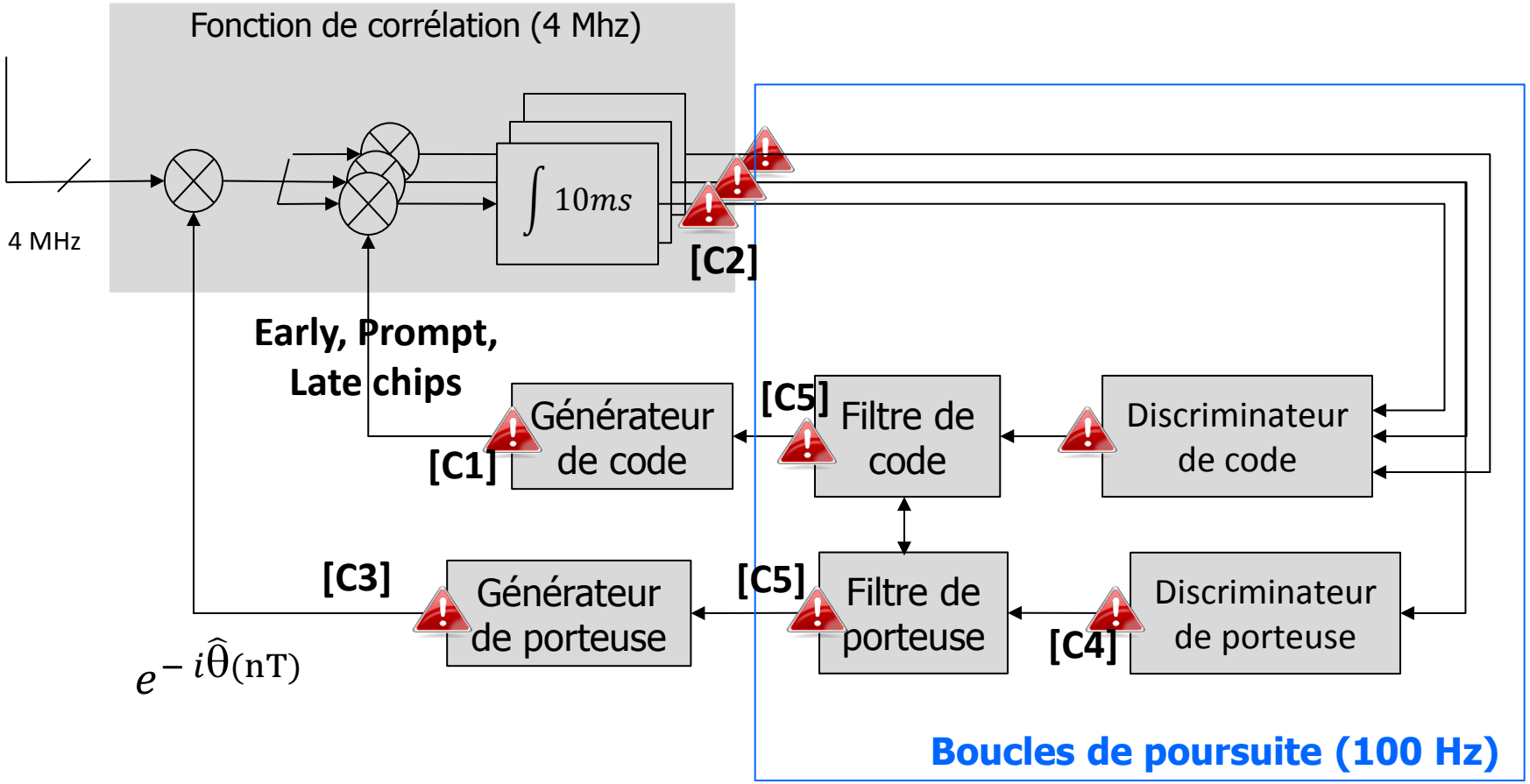
$$\sigma_p^2 = \sigma_{\boldsymbol{\delta}\omega}^2(p=0) - \sigma_{\boldsymbol{\delta}\omega}^2(p)$$



# $\log(\sigma_E) = F(p)$



# Sensibilité de l'architecture aux erreurs



# Plan de la présentation

1. *Tolérance aux fautes pour des applications de TNS.*

2. *Robustesse d'un canal de poursuite GPS.*

3. *Plateforme d'expérimentation et de mesures.*

*Conclusion et perspectives.*

# Carte ASIC à concevoir pour RELIASIC

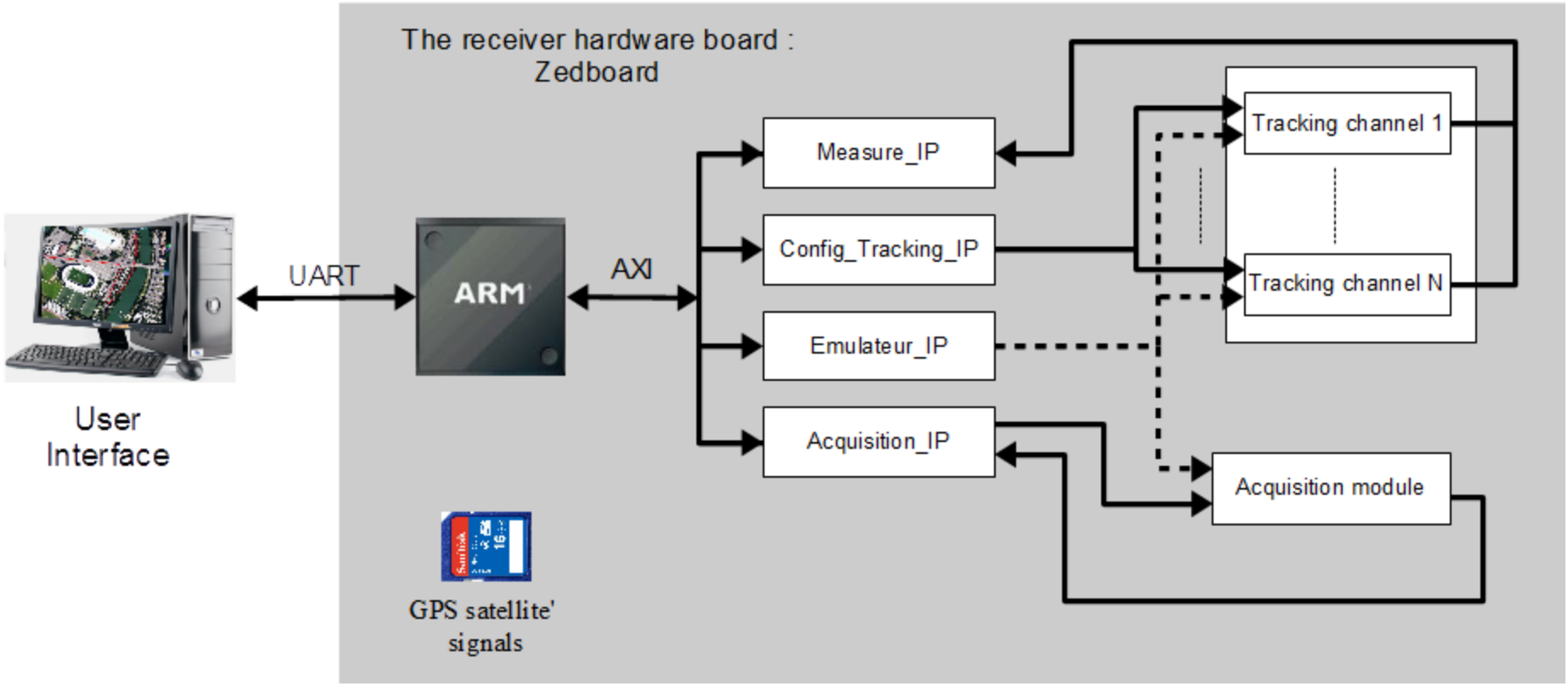
- Cinq versions de la fonction de poursuite à inclure dans l'ASIC
  1. Référence (4 canaux),
  2. TMR 1 Voter partout (4 canaux de poursuite),
  3. Version TMR 3 Voters (1 canal de poursuite),
  4. Robuste avec les techniques proposées durant la thèse (4 canaux de poursuite),
  5. Corrélation en DSC et le reste en TMR 1 Voter (4 canaux de poursuite),

- **<u>Fonctionnalités:</u>**
  1. Configurer les canaux ( 162 bits à transmettre vers la carte).
  2. Récupérer les messages de navigation et quelques sorties internes (318 bits par canal).

- **<u>Contraintes de l'ASIC:</u>**

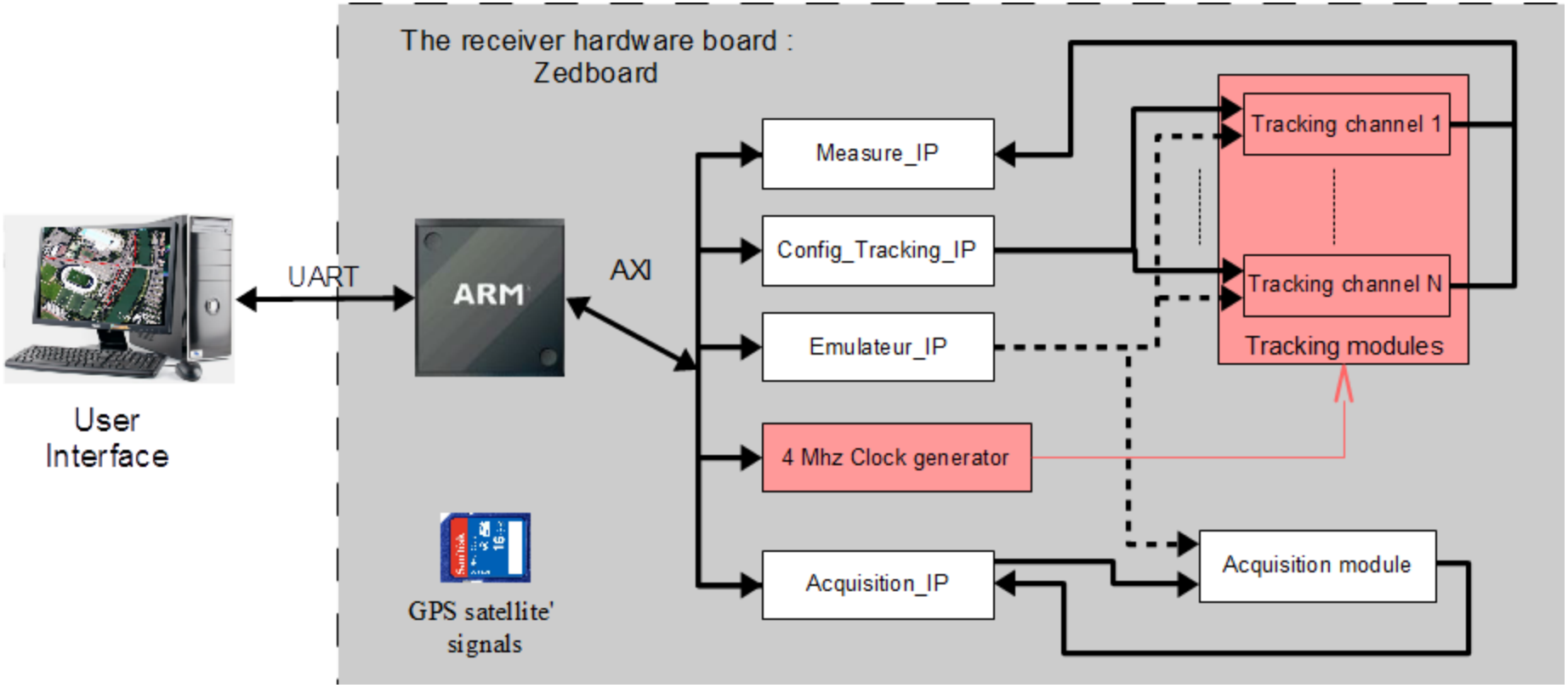
  Nombre d'entrées/sorties de l'ASIC limité.

# Version ISAE

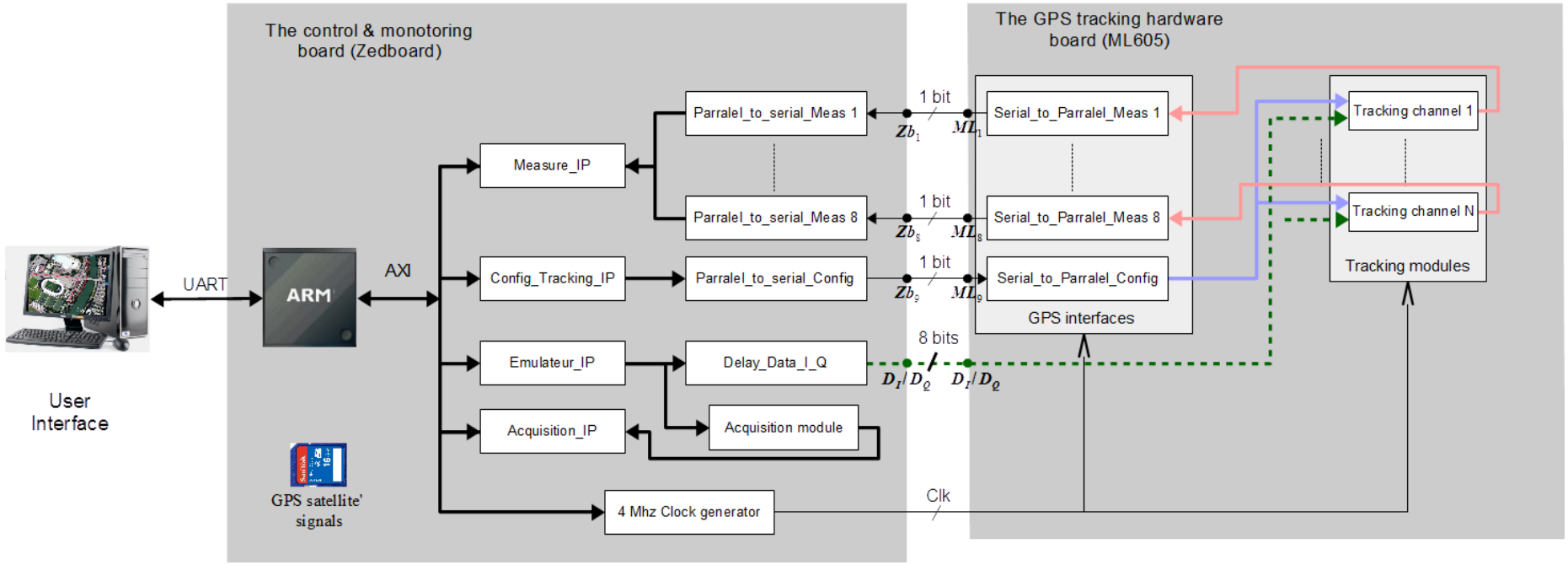



ISAE: Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace

# Contribution 1: Adapter la platforme avec nos objectifs



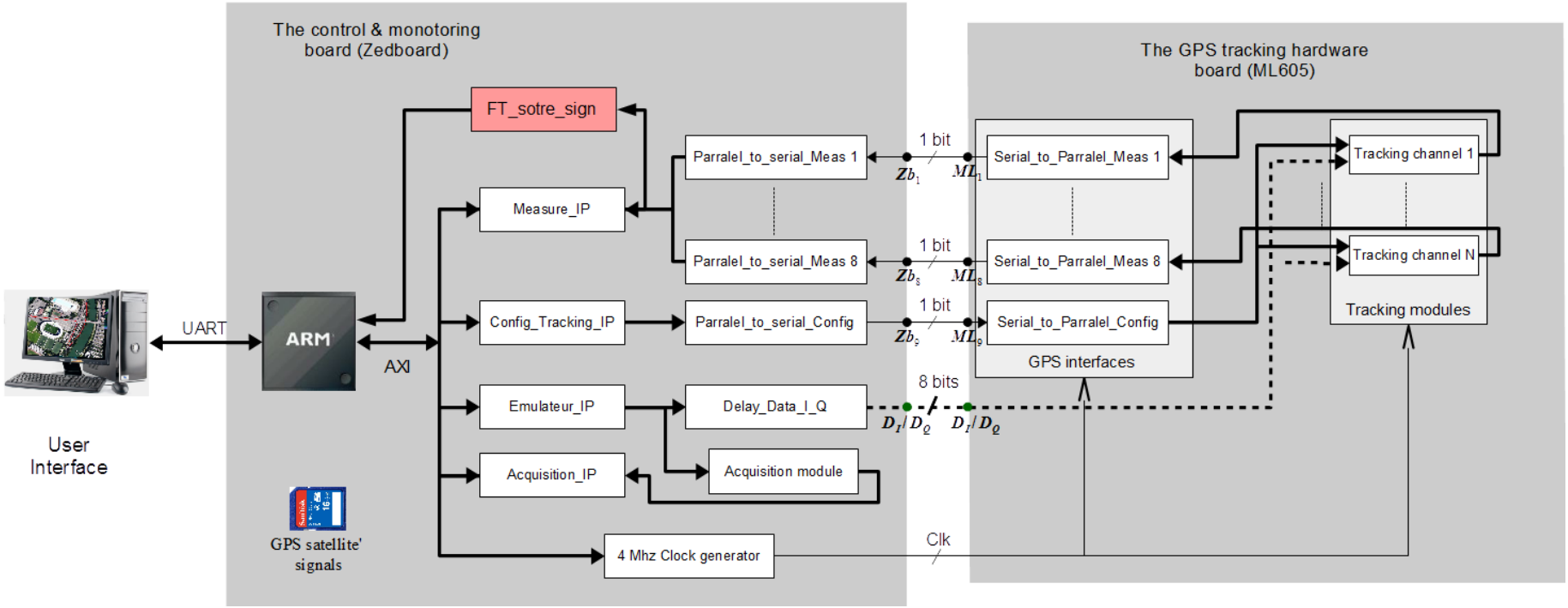
# Contribution 2: Isoler la partie poursuite



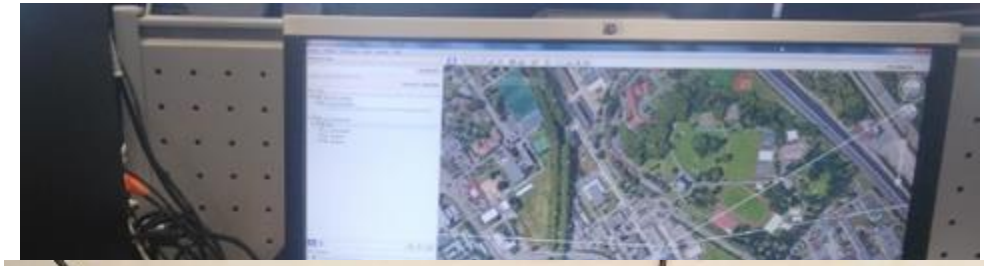

*Configuration*

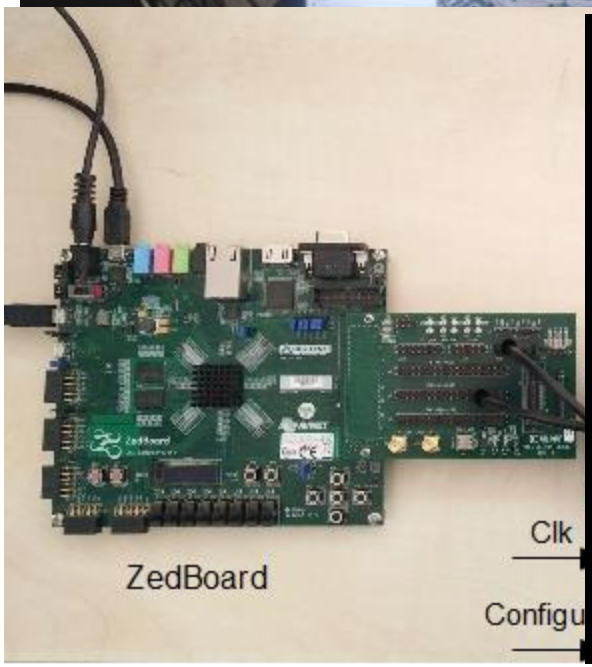
*Mesures*

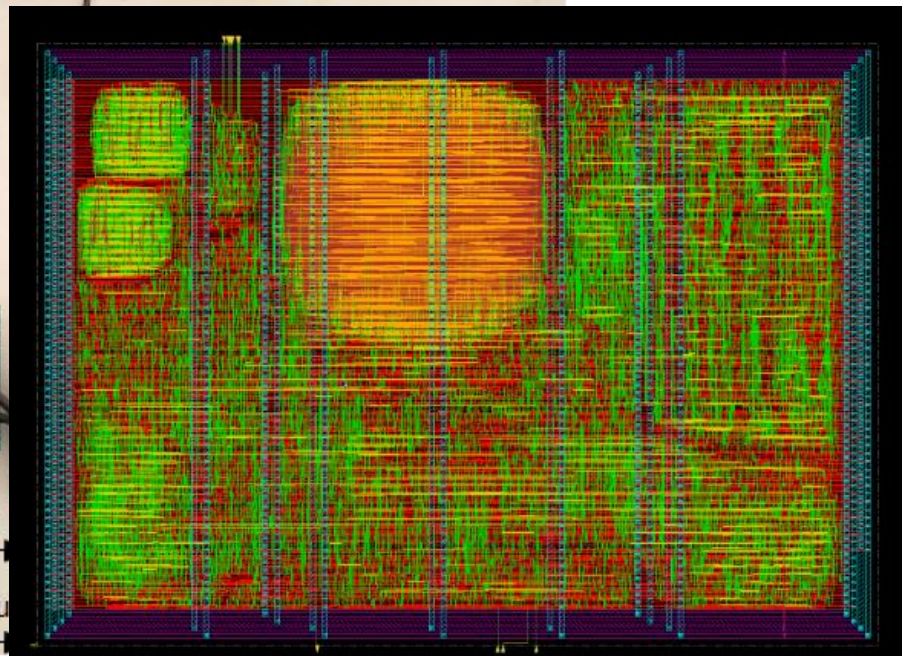
# Contribution 3: Améliorer l'observabilité des signaux



# Contribution 3: Améliorer l'observabilité des signaux





Virtex ML605

Mésures

# Plan de la présentation

1. *Tolérance aux fautes pour des applications de TNS.*
2. *Robustesse d'un canal de poursuite GPS.*
3. *Plateforme d'expérimentation et de mesures.*

*Conclusion et perspectives.*

# Conclusion

- En TNS, possibilité d'utilisation opportuniste de
  1) redondance de calcul,
  2) propriétés des fonctions (morphisme).

  ☛ Nouvelles architectures basées sur la duplication, les codes correcteurs d'erreurs et le calcul des syndromes : DSC et FT-ECC.

- Module de poursuite du GPS :
  1) Proposition d'une méthodologie d'analyse,
  2) Fiabilisation des modules sensibles aux erreurs.

- Travail d'ingénierie pour préparer les codes VHDL et l'environnement d'expérimentations et de mesures à utiliser une fois l'ASIC conçu.

# Perspectives

- Extension des techniques à d'autres applications : Comm. Num., Traitement d'images …
- Exploitation de l'ASIC :
  - Plusieurs tests programmés pour provoquer l'apparition des erreurs dans le circuit : baisse de la tension d'alimentation, échauffement, des perturbations électromagnétiques, clock skew …

    => Déterminer les modèles réels d'apparition d'erreurs.
  - Une série variée de scénarios GPS et de mesures permettant d'analyser la robustesse des méthodes proposées dans un circuit réel
  - L'étude conjointe de la consommation et de la QoS des différentes architectures.

Nouvelles questions, nouveaux projets et collaborations

# Récapitulatif de la thèse

- **Conférences internationales:**

**[C1]:** M. M. Hafidhi, E. Boutillon and C. Winstead "Reliable gold code generators for gps receivers,"in 2015 IEEE 58th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), Aug 2015.
**[C2]:** M. M. Hafidhi, E. Boutillon and C. Winstead, "Reducing the impact of internal upsets inside the correlation process in gps receivers,"in Conference on Design and Architectures for Signal and Image Processing (DASIP), Sept 2015.
**[C3]:** M. Dridi, M. M. Hafidhi, C. Winstead and E. Boutillon, "Reliable NCO carrier generators for GPS receivers," *2015 Conference on Design and Architectures for Signal and Image Processing (DASIP)*, Krakow, 2015, pp. 1-5.
**[C4]:** M. M. Hafidhi and E. Boutillon, “Improving the performance of the carrier tracking loop for gps receivers in presence of transient errors due to pvt variations,” in 2016 IEEE International Workshop on Signal Processing Systems (SiPS), Oct 2016.
**[C5]:** M. M. Hafidhi and E. Boutillon, “Hardware error correction using local syndromes,” in 2017 IEEE International Workshop on Signal Processing Systems (SiPS), Oct 2017.

- **Démo-Night:**

1. M. M. Hafidhi, E. Boutillon, A. Dion “Demo : Localisation in a faulty digital GPS receiver”, in Design and Architectures for Signal and Image Processing conference (DASIP), France, Oct. 2016.
2. M. M. Hafidhi, S. Samuel, I. Wali, A. Dion and E. Boutillon “Demo : Tracking loop of a GPS receiver under noisy hardware”, in 2017 IEEE International Workshop on Signal Processing Systems (SiPS), Oct 2017.

- **Mobilités:**

1. Utah State University, USA (Mars 2015)
2. ISAE, Toulouse (Fevrier 2016, Janvier 2017)

# Références


[J. V. Neumann 1956] J. v. Neumann, “Probabilistic logics and synthesis of reliable organisms from unreliable components,” in Automata Studies, 1956.

[B. L. Garner 1959] B. L. Garner, “The residue number system,” Managing Requirements Knowledge, International Workshop on, vol. 0, 1959.

[E. Lyons et al. 1962]. E. Lyons and W. Vanderkulk, “The use of triple-modular redundancy to improve computer reliability,” IBM J. Res. Dev., vol. 6, 1962.

[R. Hegde et al. 2004] R. Hegde and N. R. Shanbhag, "Energy-efficient signal processing via algorithmic noise-tolerance," Proceedings. 1999 International Symposium on Low Power Electronics and Design, San Diego, CA, USA, 1999.

[D. Ernst et al. 2003] D. Ernst, N. S. Kim, S. Das, S. Pant, R. Rao, T. Pham, C. Ziesler, D. Blaauw, T. Austin, K. Flautner, and T. Mudge, “Razor: a low-power pipeline based on circuit level timing speculation,” in Microarchitecture, 2003. MICRO-36. Proceedings. 36th Annual IEEE/ACM International Symposium on, Dec 2003.

[B. Shim et al. 2004] B. Shim, S. R. Sridhara, and N. R. Shanbhag, “Reliable low-power digital signal processing via reduced precision redundancy,” IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems , vol. 12, May 2004.

[V. Gherman et al. 2009] V. Gherman, S. Evain, M. Cartron, N. Seymour, and Y. Bonhomme, “System-level hardware-based protection of memories against soft-errors,” in Design, Automation Test in Europe Conference Exhibition, DATE ’09, 2009.

[M. Choudhury et al. 2010] M. Choudhury, V. Chandra, K. Mohanram, and R. Aitken, “Timber: Time borrowing and error relaying for online timing error resilience,” in Design, Automation Test in Europe Conference Exhibition (DATE), March 2010

[C. Winstead et al. 2011] C. Winstead, Y. Luo, E. Monzon, and A. Tejeda, “An error correction method for binary and multiple-valued logic,” in Multiple-Valued Logic (ISMVL), 2011 41st IEEE International Symposium on, May 2011.

[Y. Tang 2013] Y. Tang, Computation on unreliable architecture. PhD thesis, Universite Bretagne Sud, 2013.

# Merci de votre attention.

# Un circuit de réception GPS tolérant aux erreurs de l'électronique

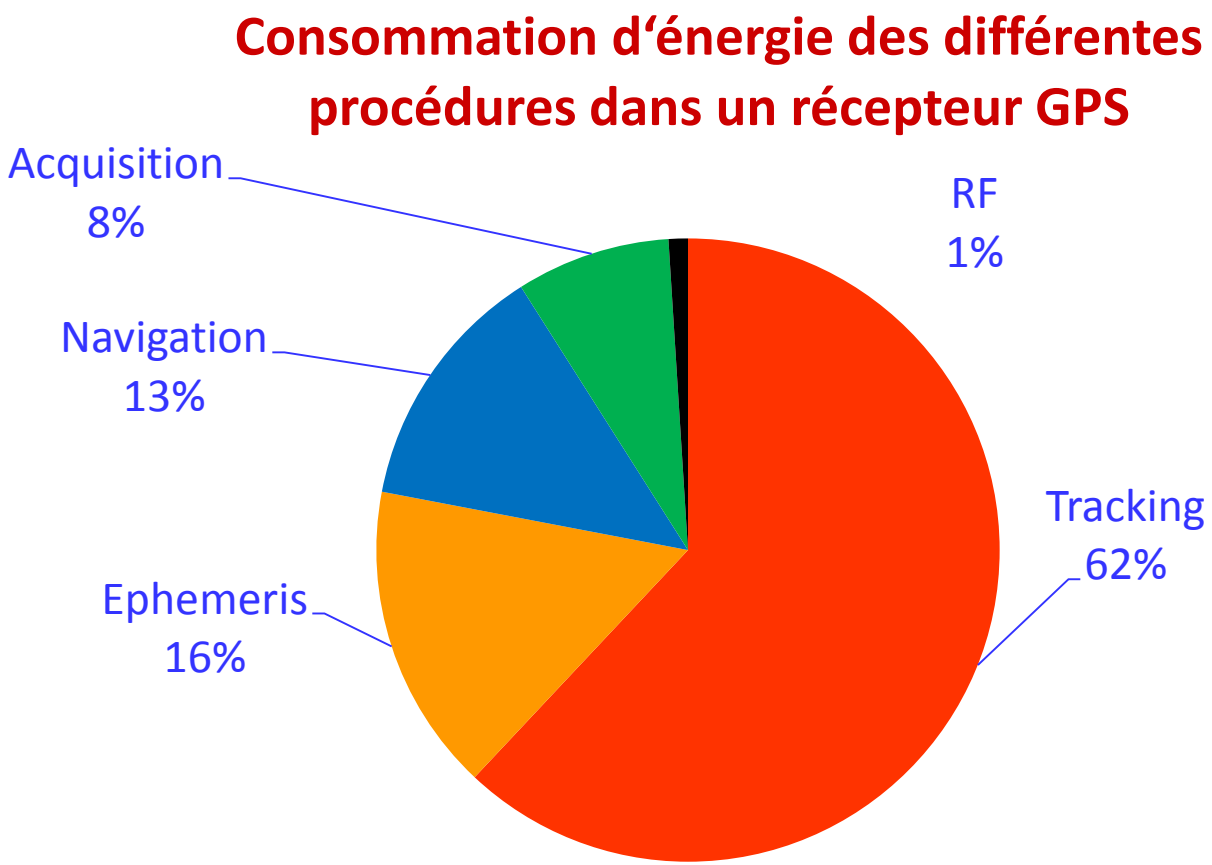

**Mohamed Mourad HAFIDHI**

**Directeur de thèse** : Emmanuel BOUTILLON



**Project RELIABLE ASIC (RELIASIC)**

# Consommation d'un récepteur GPS




[7] K. Chen and G. Tan, "Modeling and improving the energy performance of GPS receivers for mobile applications," CoRR, vol. abs/1503.02656, 2015. [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/1503.02656

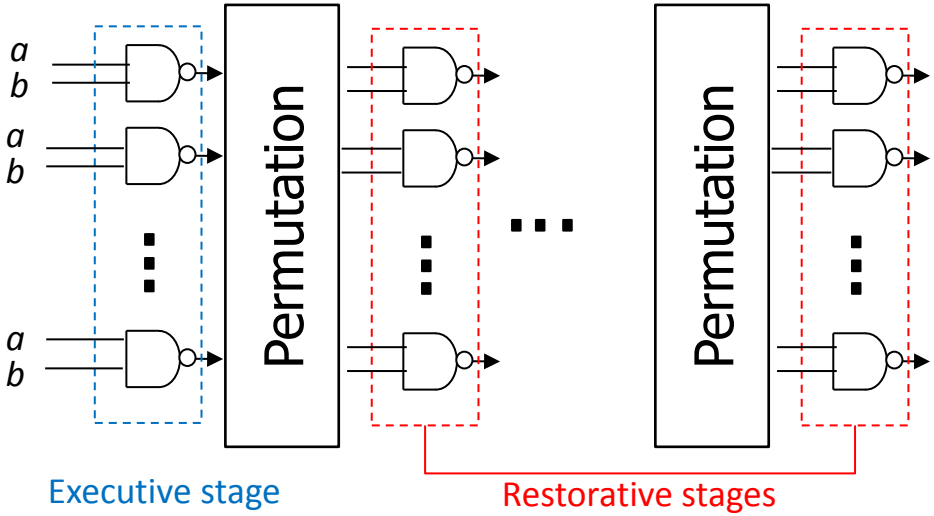
# Contribution 3: Améliorer l'observabilité des signaux

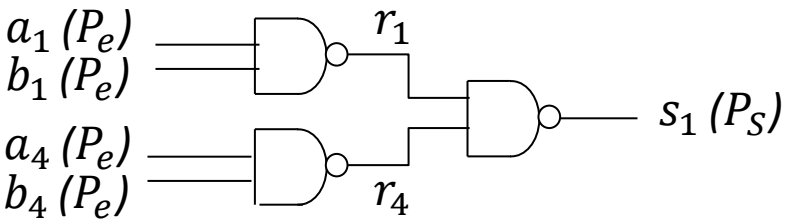
Problems | Tasks | Console | Properties | SDK Terminal

<terminated> Test_Mem.elf [Xilinx C/C++ application (GDB)] D:\VHDL_Work\GPS_2_MChnall_edit\Receiver_Zedboard\Receiver\Receiver_0\Receiver_0.sdk\Test_Mem\Debu

| | | Chn1 | | | | | | Chn2 | | | | | | Chn3 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | E_I | P_I | L_I | E_Q | P_Q | L_Q | E_I | P_I | L_I | E_Q | P_Q | L_Q | E_I | P_I | L_I | E_Q | P_Q | L_Q |
| Data : | 001 | 0593 | 0D01 | 0815 | 0134 | 0100 | FFA2 | 0804 | 0D5A | 0866 | 0103 | 014D | 005D | 03E5 | 085F | 0559 | FF5D | 00F5 | FFA7 |
| Data : | 002 | 07BC | 0D34 | 0610 | FFBF | 00B5 | 0057 | 0804 | 0D5A | 0866 | 0103 | 014D | 005D | 03E5 | 085F | 0559 | FF5D | 00F5 | FFA7 |
| Data : | 003 | 07BC | 0D34 | 0610 | FFBF | 00B5 | 0057 | 0804 | 0D5A | 0866 | 0103 | 014D | 005D | 03E5 | 085F | 0559 | FF5D | 00F5 | FFA7 |
| Data : | 004 | 07BC | 0D34 | 0610 | FFBF | 00B5 | 0057 | 0804 | 0D5A | 0866 | 0103 | 014D | 005D | 04C6 | 097C | 0516 | 0049 | FF71 | 003D |
| Data : | 005 | 07BC | 0D34 | 0610 | FFBF | 00B5 | 0057 | 0759 | 0EE5 | 07BB | FEAD | FEC7 | FFFB | 04C6 | 097C | 0516 | 0049 | FF71 | 003D |
| Data : | 006 | 081C | 0D7E | 05DA | 0089 | 00FD | 00CF | 0759 | 0EE5 | 07BB | FEAD | FEC7 | FFFB | 04C6 | 097C | 0516 | 0049 | FF71 | 003D |
| Data : | 007 | 081C | 0D7E | 05DA | 0089 | 00FD | 00CF | 0759 | 0EE5 | 07BB | FEAD | FEC7 | FFFB | 04C6 | 097C | 0516 | 0049 | FF71 | 003D |
| Data : | 008 | 081C | 0D7E | 05DA | 0089 | 00FD | 00CF | 0759 | 0EE5 | 07BB | FEAD | FEC7 | FFFB | 042F | 0973 | 0655 | 001E | FEC4 | FF8E |
| Data : | 009 | 081C | 0D7E | 05DA | 0089 | 00FD | 00CF | 0819 | 0F53 | 089B | FF0E | FE70 | FF4A | 042F | 0973 | 0655 | 001E | FEC4 | FF8E |
| Data : | 010 | 06F4 | 0CF0 | 0626 | FFCA | FFD8 | FEE8 | 0819 | 0F53 | 089B | FF0E | FE70 | FF4A | 042F | 0973 | 0655 | 001E | FEC4 | FF8E |
| Data : | 011 | 06F4 | 0CF0 | 0626 | FFCA | FFD8 | FEE8 | 0819 | 0F53 | 089B | FF0E | FE70 | FF4A | 042F | 0973 | 0655 | 001E | FEC4 | FF8E |
| Data : | 012 | 06F4 | 0CF0 | 0626 | FFCA | FFD8 | FEE8 | 0819 | 0F53 | 089B | FF0E | FE70 | FF4A | 0495 | 09E5 | 056D | 0087 | FF65 | FE89 |
| Data : | 013 | 06F4 | 0CF0 | 0626 | FFCA | FFD8 | FEE8 | 0907 | 0F49 | 0873 | FE8D | FF5D | FFB1 | 0495 | 09E5 | 056D | 0087 | FF65 | FE89 |
| Data : | 014 | 0845 | 0E07 | 0881 | FEB9 | FF1D | FF05 | 0907 | 0F49 | 0873 | FE8D | FF5D | FFB1 | 0495 | 09E5 | 056D | 0087 | FF65 | FE89 |
| Data : | 015 | 0845 | 0E07 | 0881 | FEB9 | FF1D | FF05 | 0907 | 0F49 | 0873 | FE8D | FF5D | FFB1 | 0495 | 09E5 | 056D | 0087 | FF65 | FE89 |
| Data : | 016 | 0845 | 0E07 | 0881 | FEB9 | FF1D | FF05 | 0907 | 0F49 | 0873 | FE8D | FF5D | FFB1 | 0528 | 0A02 | 063E | 02F9 | 01ED | 0017 |
| Data : | 017 | 0845 | 0E07 | 0881 | FEB9 | FF1D | FF05 | 07AE | 0EB8 | 08B4 | 0000 | 018A | 01C2 | 0528 | 0A02 | 063E | 02F9 | 01ED | 0017 |
| Data : | 018 | 06B2 | 0C98 | 052C | 0115 | 0181 | 003B | 07AE | 0EB8 | 08B4 | 0000 | 018A | 01C2 | 0528 | 0A02 | 063E | 02F9 | 01ED | 0017 |
| Data : | 019 | 06B2 | 0C98 | 052C | 0115 | 0181 | 003B | 07AE | 0EB8 | 08B4 | 0000 | 018A | 01C2 | 0528 | 0A02 | 063E | 02F9 | 01ED | 0017 |
| Data : | 020 | 06B2 | 0C98 | 052C | 0115 | 0181 | 003B | 07AE | 0EB8 | 08B4 | 0000 | 018A | 01C2 | 047B | 08AD | 041B | 0132 | 019E | 00EE |
| Data : | 021 | 06B2 | 0C98 | 052C | 0115 | 0181 | 003B | 086D | 0FD3 | 08EB | FF70 | 000A | FE50 | 047B | 08AD | 041B | 0132 | 019E | 00EE |
| Data : | 022 | 0875 | 0D3D | 0539 | FF03 | FE9B | FF89 | 086D | 0FD3 | 08EB | FF70 | 000A | FE50 | 047B | 08AD | 041B | 0132 | 019E | 00EE |
| Data : | 023 | 0875 | 0D3D | 0539 | FF03 | FE9B | FF89 | 086D | 0FD3 | 08EB | FF70 | 000A | FE50 | 047B | 08AD | 041B | 0132 | 019E | 00EE |
| Data : | 024 | 0875 | 0D3D | 0539 | FF03 | FE9B | FF89 | 086D | 0FD3 | 08EB | FF70 | 000A | FE50 | 039A | 07EA | 045A | 00D7 | 00A1 | 00B9 |
| Data : | 025 | 0875 | 0D3D | 0539 | FF03 | FE9B | FF89 | 0648 | 0DEE | 090E | FF45 | FF9B | 00B1 | 039A | 07EA | 045A | 00D7 | 00A1 | 00B9 |
| Data : | 026 | 07FF | 0D8F | 066D | 01A5 | FFB3 | FF9D | 0648 | 0DEE | 090E | FF45 | FF9B | 00B1 | 039A | 07EA | 045A | 00D7 | 00A1 | 00B9 |
| Data : | 027 | 07FF | 0D8F | 066D | 01A5 | FFB3 | FF9D | 0648 | 0DEE | 090E | FF45 | FF9B | 00B1 | 039A | 07EA | 045A | 00D7 | 00A1 | 00B9 |
| Data : | 028 | 07FF | 0D8F | 066D | 01A5 | FFB3 | FF9D | 0648 | 0DEE | 090E | FF45 | FF9B | 00B1 | 0533 | 09A3 | 0543 | 00C5 | 0095 | 004F |
| Data : | 029 | 07FF | 0D8F | 066D | 01A5 | FFB3 | FF9D | 073E | 0DFE | 076A | FFCE | FFB2 | 0096 | 0533 | 09A3 | 0543 | 00C5 | 0095 | 004F |
| Data : | 030 | 07AA | 0E64 | 060C | FFFF | 0099 | FF23 | 073E | 0DFE | 076A | FFCE | FFB2 | 0096 | 0533 | 09A3 | 0543 | 00C5 | 0095 | 004F |
| Data : | 031 | 07AA | 0E64 | 060C | FFFF | 0099 | FF23 | 073E | 0DFE | 076A | FFCE | FFB2 | 0096 | 0533 | 09A3 | 0543 | 00C5 | 0095 | 004F |
| Data : | 032 | 07AA | 0E64 | 060C | FFFF | 0099 | FF23 | 073E | 0DFE | 076A | FFCE | FFB2 | 0096 | 0466 | 0A04 | 06D8 | FF13 | FF73 | 0083 |
| Data : | 033 | 07AA | 0E64 | 060C | FFFF | 0099 | FF23 | 0837 | 0E05 | 092B | FF26 | FDA2 | FE50 | 0466 | 0A04 | 06D8 | FF13 | FF73 | 0083 |
| Data : | 034 | 0676 | 0CC6 | 075A | 0036 | 0064 | FFC4 | 0837 | 0E05 | 092B | FF26 | FDA2 | FE50 | 0466 | 0A04 | 06D8 | FF13 | FF73 | 0083 |
| Data : | 035 | 0676 | 0CC6 | 075A | 0036 | 0064 | FFC4 | 0837 | 0E05 | 092B | FF26 | FDA2 | FE50 | 0466 | 0A04 | 06D8 | FF13 | FF73 | 0083 |
| Data : | 036 | 0676 | 0CC6 | 075A | 0036 | 0064 | FFC4 | 0837 | 0E05 | 092B | FF26 | FDA2 | FE50 | 037E | 0812 | 03DE | FF47 | FEB5 | FF91 |
| Data : | 037 | 0676 | 0CC6 | 075A | 0036 | 0064 | FFC4 | 072E | 0DF8 | 076E | 004E | 0144 | 01C4 | 037E | 0812 | 03DE | FF47 | FEB5 | FF91 |
| Data : | 038 | 07D0 | 0E1A | 072C | FFAB | FFC3 | 000F | 072E | 0DF8 | 076E | 004E | 0144 | 01C4 | 037E | 0812 | 03DE | FF47 | FEB5 | FF91 |
| Data : | 039 | 07D0 | 0E1A | 072C | FFAB | FFC3 | 000F | 072E | 0DF8 | 076E | 004E | 0144 | 01C4 | 037E | 0812 | 03DE | FF47 | FEB5 | FF91 |
| Data : | 040 | 07D0 | 0E1A | 072C | FFAB | FFC3 | 000F | 072E | 0DF8 | 076E | 004E | 0144 | 01C4 | 04E6 | 09B6 | 0596 | FFF5 | 008F | FE7F |
| Data : | 041 | 07D0 | 0E1A | 072C | FFAB | FFC3 | 000F | 094F | 0F31 | 0827 | 00C2 | FF5C | FFD4 | 04E6 | 09B6 | 0596 | FFF5 | 008F | FE7F |

# La solution de Von Neumann




$a_1 . b_1 + a_4 . b_4 \Rightarrow s_1$

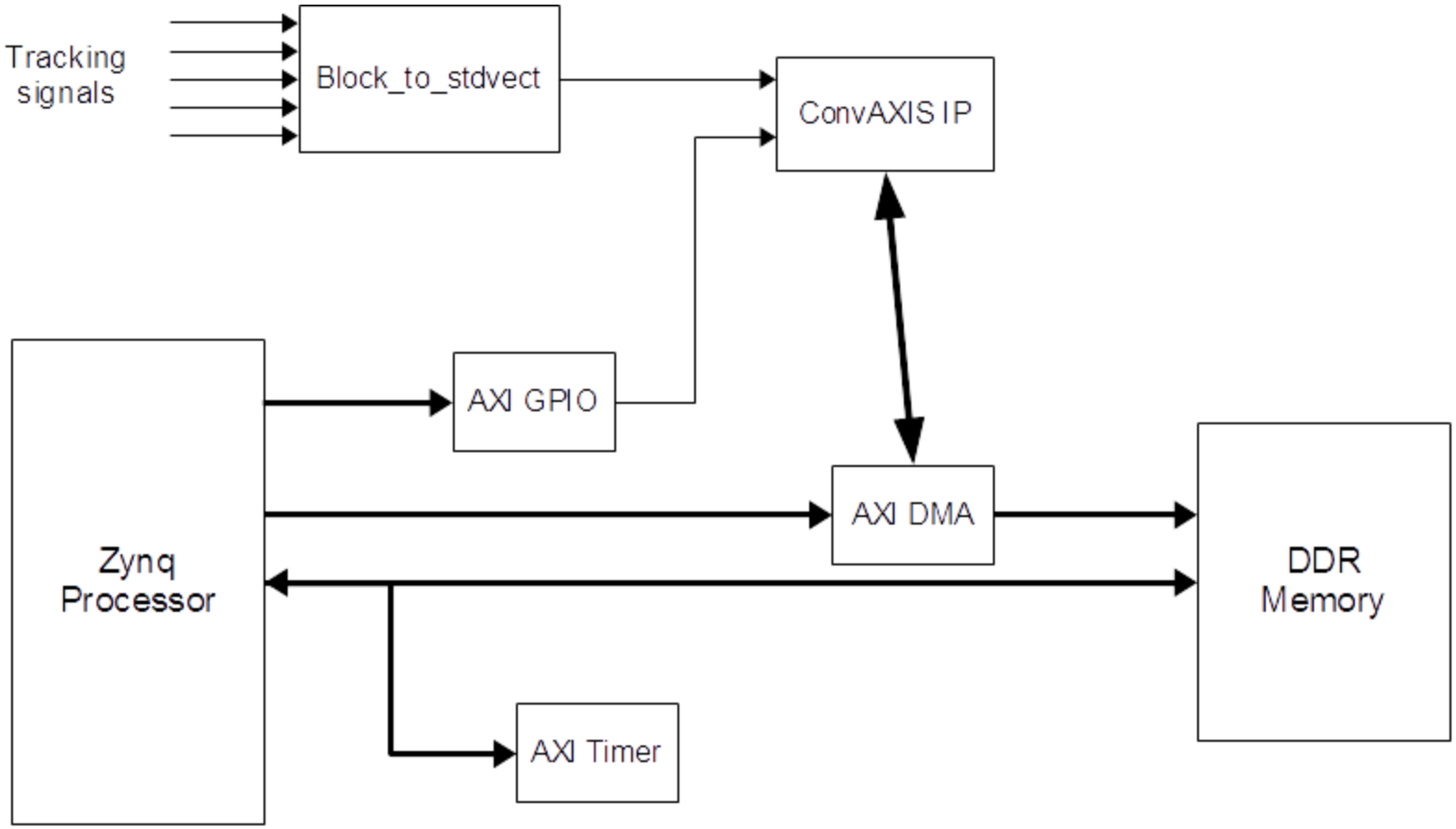
0.0 + 0.0 => 0
1.0 + 0.0 => 0
0.1 + 0.0 => 0
0.0 + 1.0 => 0
0.0 + 0.1 => 0
1.0 + 0.1 => 0
1.0 + 1.0 => 0
0.1 + 0.1 => 0
0.1 + 1.0 => 0
Reste => 1

➡ Correction d'une erreur sur l'une des quatre entrées et la moitié des cas où deux erreurs apparaissent sur les entrées.

$$P_s \approx 1 - [(1 - P_e)^4 + 4 P_e (1 - P_e)^3 + 4 P_e^2 (1 - P_e)^2](1 - \varepsilon)^3$$

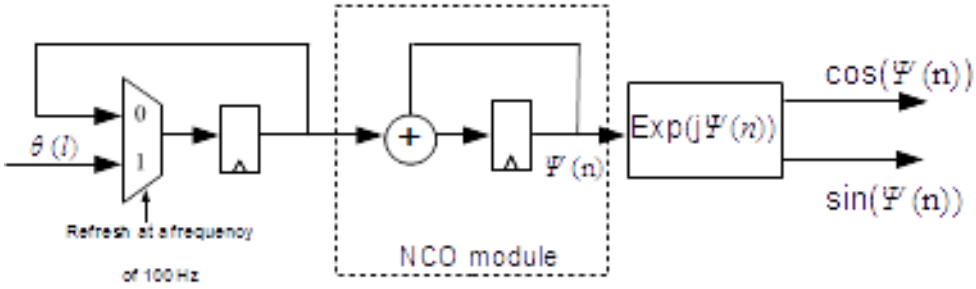
<u>Exp:</u> $P_e$ = 0.1 et $\varepsilon$ = 0.001 => $P_s$ = 0.0228

# FT_Store_signals

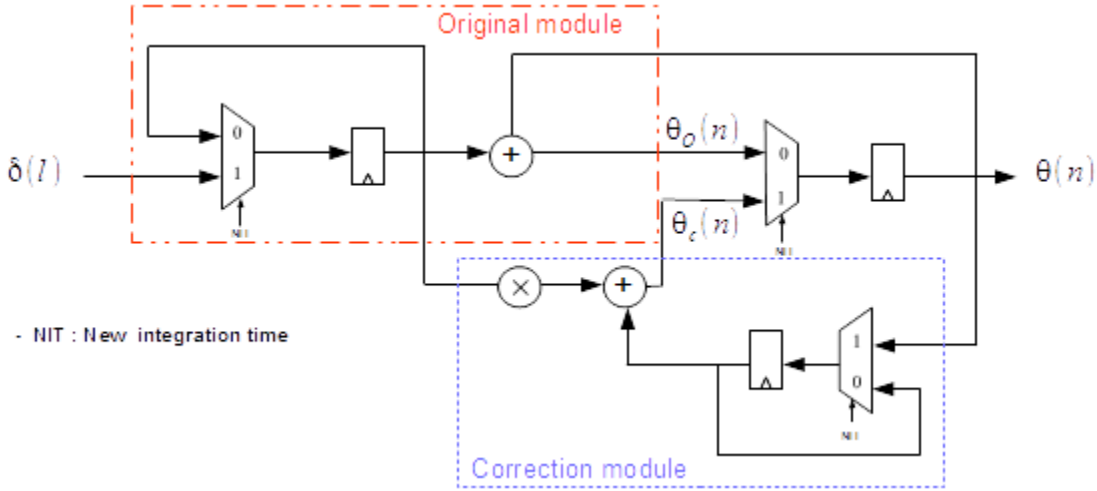


# Protéger la fonction de la génération de la porteuse

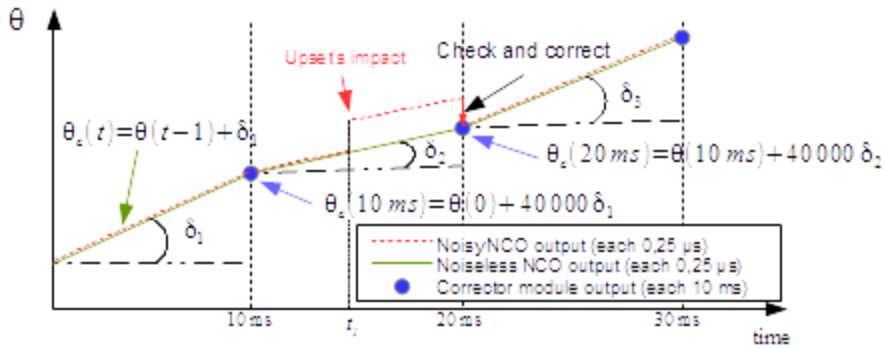
- **Le Générateur de la porteuse:**



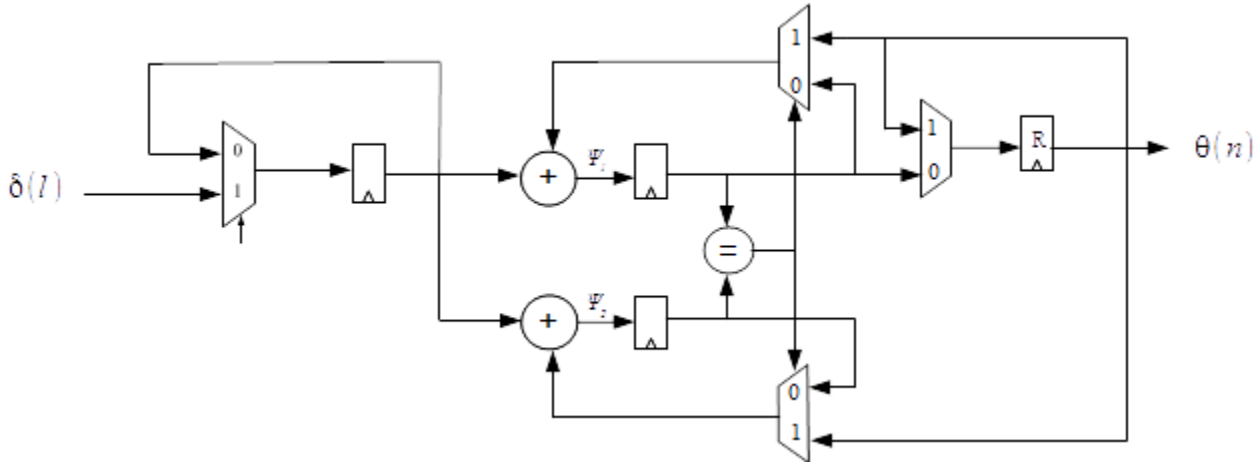
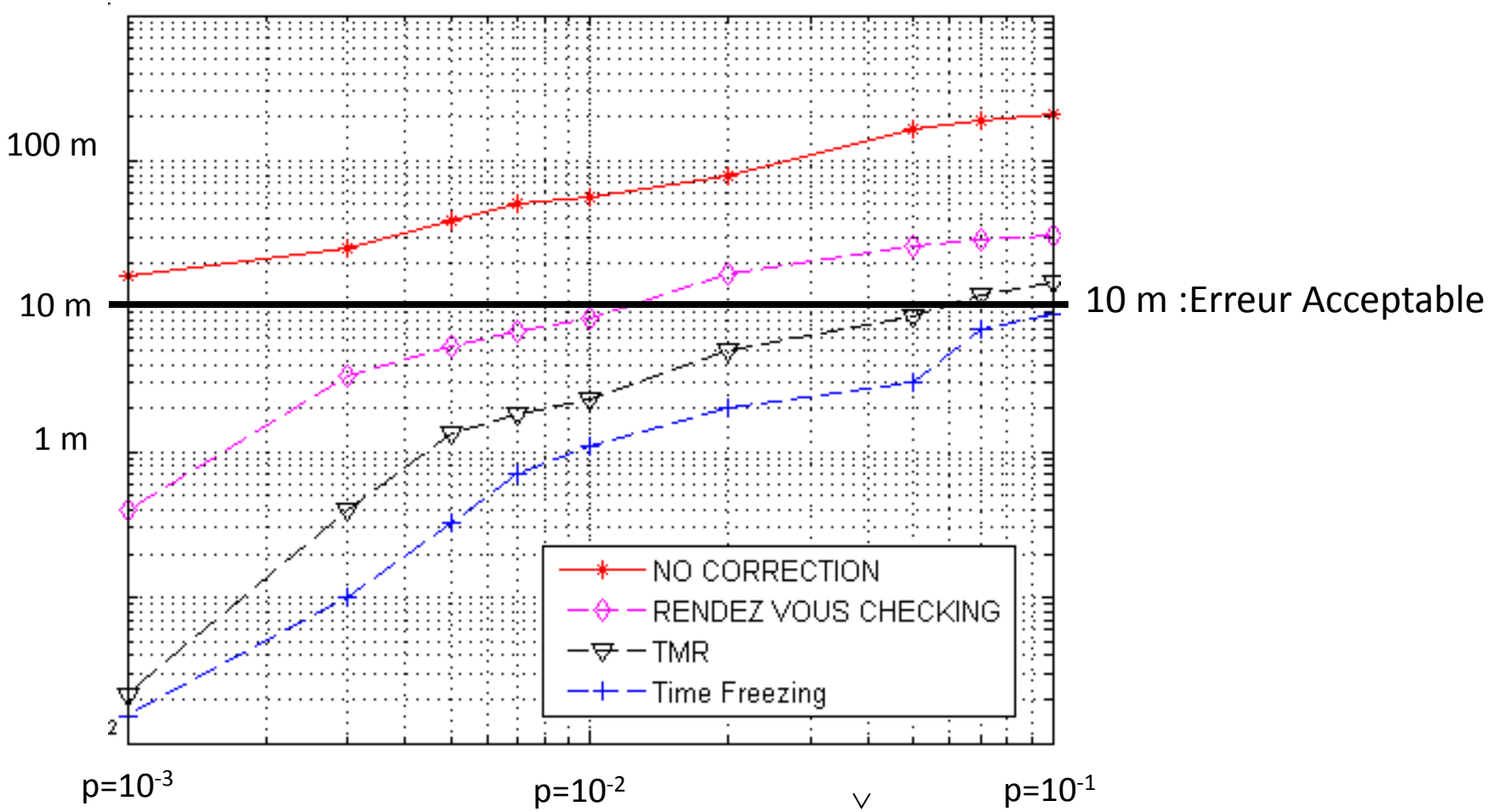

- **Méthode du rendez-vous:**



# Protéger la fonction de la génération de la porteuse




➢ **Duplication + Time Frezing:**



# $\log(\sigma_E) = F(p)$