Robustesse aux erreurs de transmission: configuration optimale d'un réseau TTP/C

Nicolas Navet, Bruno Gaujal

Robustesse aux erreurs de transmission : configuration optimale d'un réseau TTP/C

Nicolas NAVET - Bruno GAUJAL

projet TRIO

http://www.loria.fr/~nnavet

Certaines images de cet exposé proviennent de :

-**[1] Cours de P. Koopman (http://www.ece.cmu.edu/~ece540/lecture/)**

-**[2] Slides TTPtech (http://www.tttech.com/)**

-**[3] Normes TTP v1.0**

-**[4] Simulation of a Time Triggered Protocol – D. Bradbury**

TTP – Time Triggered Protocol

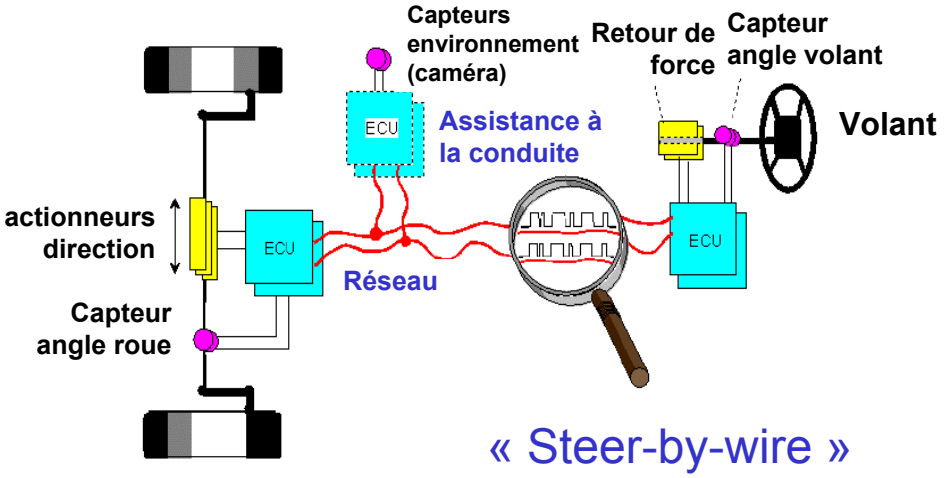
- Développé à la T.U. Vienne + TTTech
- 2 variantes : TTP/C et TTP/A
- Objectifs techniques:
  - Déterminisme
  - Tolérance aux fautes
  - Favoriser la « composabilité »
  - Support des changements de mode de marche

⇨ un bon candidat pour le X-By-Wire ..

X-by-Wire

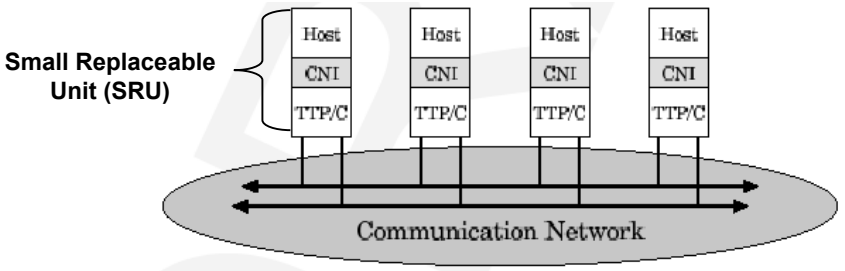
- Connexion mécanique remplacée par connexion digitale / informatique - utilisée en aéronautique depuis longtemps
- Pourquoi ?
  - Réduction encombrement - poids - vibration - maintenance
  - Assistance à la conduite - évitement des chocs
  - Moins de pollution (liquide de freins/transmission)
  - Ajout/remplacement d'équipements
  - …

X-by-wire : un exemple



« Steer-by-wire »

Structure d'un réseau TTP



- Medium Access Control : TDMA synchrone
- Support physique redondant
- Débits: 500kbit/s, 1Mbit/s, 2Mbit/s, 5Mbit/s, 25Mbit/s
- Topologie: bus ou étoile

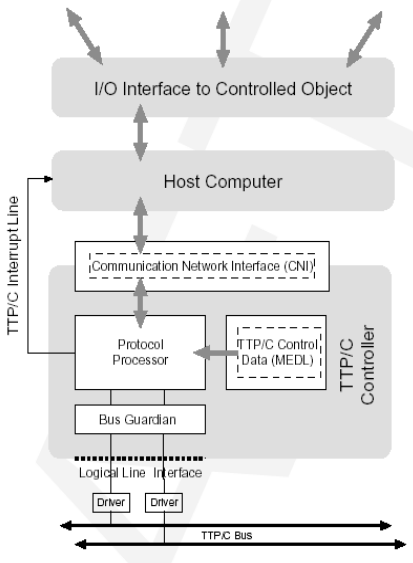
Un nœud TTP/C

Nœud ou SRU (Smallest Replaceable Unit) :

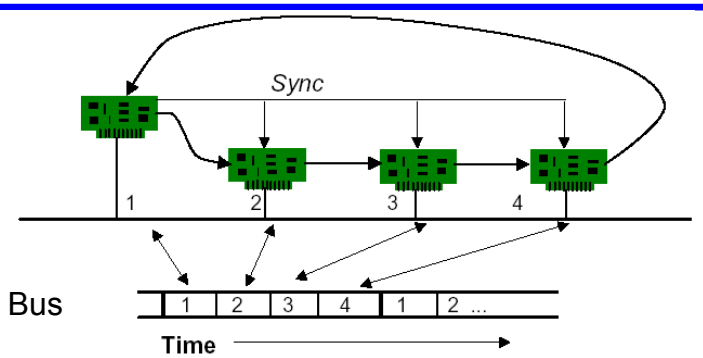
- Un micro-contrôleur
- Un contrôleur de communication TTP/C
- Une interface E/S

Contrôleur TTP/C:

- Communication Network Interface
- Le « processeur du protocole »
- Message Descriptor List
- Le « gardien » du bus

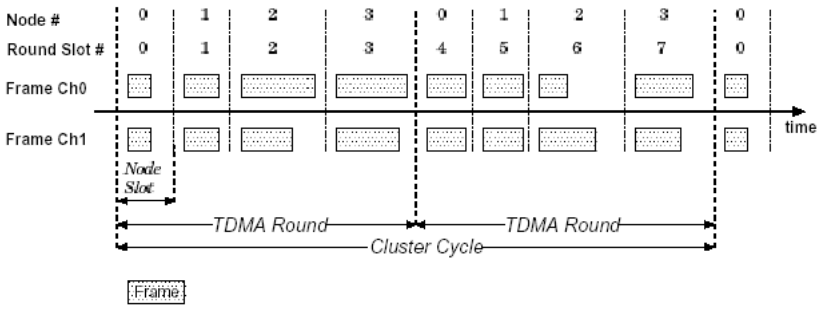


TDMA – Time Division Multiplexed Access (1/2)



- Un slot est un intervalle de temps durant lequel une station émet un message
- Un round TDMA est une séquence de slots t.q. chaque station parle exactement 1 fois

TDMA – Time division Multiplexed Access (2/2)



- Plusieurs rounds TDMA différents par les messages transmis peuvent être définis (l'ordre de transmission et la taille des slots sont nécessairement identiques)
- Un cluster est la suite de tous les rounds TDMA. Le cluster est exécuté en boucle.

TTP/C: Implications du protocole MAC

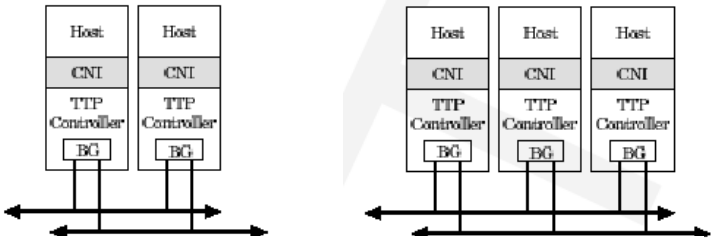
Temps de réponse borné et « heart-beat » mais:

- Perte de bande passante !
- Nécessité de micro-contrôleurs puissants
- Contrainte de temps maximum:
  - Si une station émet une seule donnée, le rafraîchissement ne peut être plus fréquent que le temps d'un round
  - Si une station émet plusieurs données, le rafraîchissement ne peut être plus fréquent que 2x le temps d'un round

Ex: contrainte de 5ms - réseau à 500kbit/s avec 200 bits par trames - au plus 12 trames (6 FTUs redondantes) ou 6 trames si la station émet 2 données.

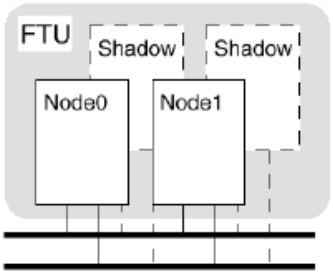
FTU: Unité tolérante aux fautes

- FTU (Fault Tolerant Unit) = ensemble de SRU's qui effectuent exactement les mêmes calculs



FTU: 2 types de redondance

- Node « fantôme » (shadow SRU) : émet dans les slots d'une station active lorsque celle-ci devient défaillante - ne possède pas de slots propres



- Node « réplique »: possède un slot propre

FTU: qu'en attendre ?

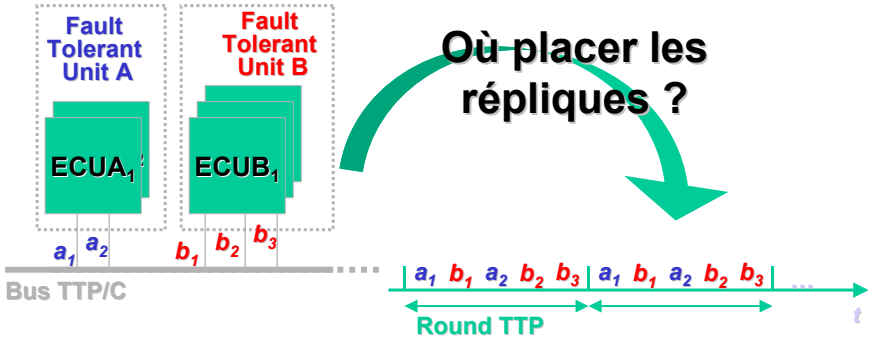
- Protection contre:
  - disparition d'une station (crash, déconnexion..)
  - des transmissions corrompues par des EMI
  - des erreurs de mesure (capteurs) ou de calcul
  - …
- Sous l'hypothèse d'une défaillance unique (hypothèse de conception de TTP/C) :
  - une redondance double assure protection dans « le domaine temporel »
  - redondance triple assure en plus une protection dans « le domaine des valeurs »
- Problèmes: history-state

Station « Fail-silent »

- Une station est « fail-silent » si :
  1. elle émet au bon instant une donnée correcte ou
  2. elle n'émet rien
- Des stations « fail-silents » simplifient grandement la conception d'une application ..
- En pratique, il n'est pas toujours possible de garantir cette propriété

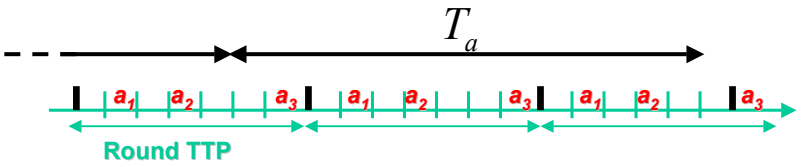
Objectif: rendre le système robuste aux perturbations

- En pratique, les erreurs de transmission sont souvent fortement corrélées



Modèle de l'application

- T_a : période de production de l'information sur chacune des stations de la FTU a



- Hypothèses:
  - pas de synchronisation entre émission (round) et production
  - période de production est multiple de la taille d'un round

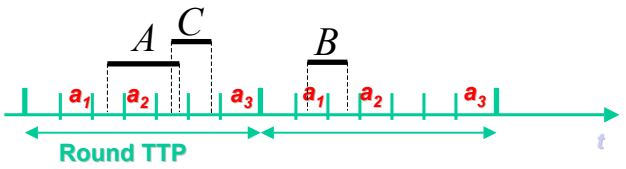
Objectifs / fail-silence

- Les stations sont fail-silents: « minimiser P*all* : la probabilité que toutes les trames d'une FTU soient corrompues pdt un cycle de production »

- Les stations ne sont pas fail-silents: « minimiser P*one* : la probabilité que une trame de la FTU ou plus soit touchée par une perturbation»

Hypothèses sur le modèle d'erreurs

- Chaque bit transmis pendant la perturbation est corrompu avec une probabilité π
- Si une perturbation recouvre la totalité d'une trame alors corruption avec proba. 1
- Les instants de début des perturbations sont uniformément répartis dans le temps
- La distribution de la taille des rafales est arbitraire



Objectif 1 : Minimiser P*one*

Majorisation - Schur-Convexité

- Le vecteur $u = (u_1, ..., u_n)$ majore $v = (v_1, ..., v_n)$ si:

$$\sum_{i=1}^{n} u_i = \sum_{i=1}^{n} v_i \quad \text{et} \quad \sum_{i=1}^{k} u_{[i]} \leq \sum_{i=1}^{k} v_{[i]} \quad k \leq n$$

avec $(u_{[i]}, ..., u_{[n]})$ permutation de u t.q. $u_{[i]} \leq ... \leq u_{[n]}$

Exemple: $(1,3,5,10) \succ (2,4,4,9)$

- Une fonction $f : \Re^n \rightarrow \Re$ est

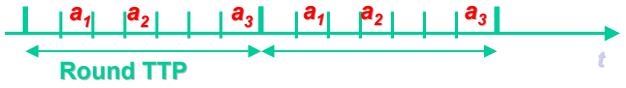
Schur-convexe si $u \succ v \rightarrow f(u) \geq f(v)$

Schur-concave si $u \succ v \rightarrow f(u) \leq f(v)$

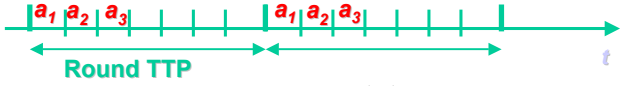
Minimiser P_{one}

- $I_i(x)$ est l'intervalle de temps entre la fin du réplica r_{i-1} et le début de r_i sous l'allocation x
- $\mathbf{I}(x)$ est le vecteur des intervalles de temps (trié par ordre croissant) pendant la durée d'un round

Exemple: $\mathbf{I}(x) = (1,1,2)$



Exemple: $\mathbf{I}(x) = (0,0,4)$



Minimiser P*one*

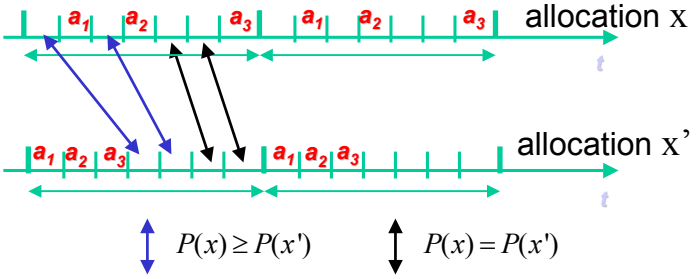
Théorème: la meilleure allocation vis-à-vis de P*one* est de grouper les replicas (allocation g)

Arguments:

- P*one* est shur concave: $\mathbf{I}(x') \succ \mathbf{I}(x) \rightarrow P_{one}(x') \leq P_{one}(x)$
- $\mathbf{I}(g)$ est maximum pour la majoration (toujours de la forme $(0,0,S-k)$ avec k le nbre de réplicas de la FTU et S le le nbre de slots par round)

Minimiser P*one*

- Idée de la preuve: plus une rafale d'erreurs commence loin d'un replica, moins elle a de chances de le corrompre. Les allocations « non-groupées » ont plus de zones proches des réplicas



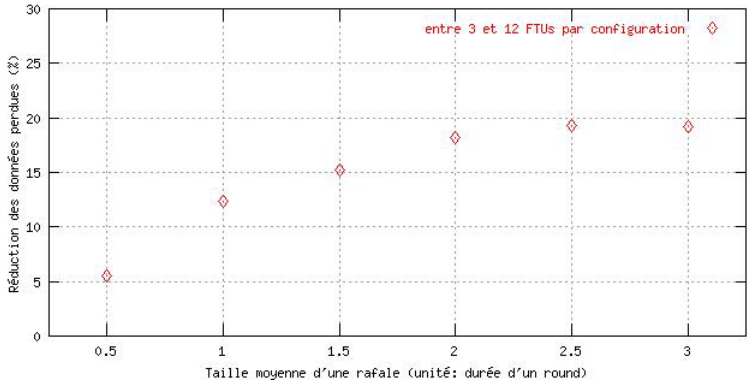
Minimiser P*one*

- Validité du résultat :
  - π quelconque / distribution taille arbitraire
  - pour une période de production multiple de la taille d'un round
  - pour tout réseau TDMA

➢ Il est possible de minimiser simultanément P*one* pour chacune des FTU's du système

Gain en robustesse : P*one*

- Réduction du nombre de messages perdus par rapport à une allocation aléatoire:



➢ Gain moyen > 15%

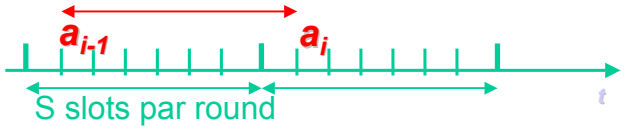
Objectif 2 : Minimiser P*all*

2.1 **Le cas TTP/C**

2.2 Le cas général TDMA

TTP/C : la règle de la majorité

- Cliques: ensembles de stations ayant une vision ≠ du système (ex: vision des stations qui fonctionnent correctement)
- Principe: pour éviter la formation de cliques, déconnexion des stations « minoritaires »
- Mécanisme: avant d'émettre, une station vérifie que dans le dernier round (S slots), le nbre de messages correctement émis est supérieur au nbre de messages incorrects, sinon déconnexion (« freeze »)



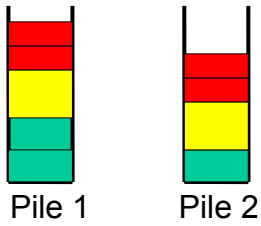
➢ En cas d'erreurs de transmission multiples: si une station « freeze » alors les stations s'arrêtent une à une ..

TTP/C : minimiser P*all*

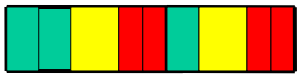
Algorithme: 1) pour chaque FTU i avec C_i slots mettre $\lceil C_i / 2 \rceil$ slots dans la pile 1 et $\lfloor C_i / 2 \rfloor$ dans la pile 2

2) concatener les deux piles

Ex: FTU A: 3 replicas – FTU B: 2 replicas – FTU C: 4 replicas



Round TTP/C :



TTP/C : minimiser P*all*

Théorème: L'algorithme « des deux piles » est optimal sous TTP/C

Arguments:

Cas 1) une rafale par réplica : identique allocation

Cas 2) une rafale touche plusieurs réplicas avec une probabilité décroissante avec distance entre réplicas. Une rafale de plus de $\lfloor S / 2 \rfloor$ slots arrête le système or l'algo garantit un écart de $\lfloor S / 2 \rfloor$ slots

Corollaire: Il est inutile d'avoir plus de 2 replicas par FTU si la probabilité d'avoir plus d'une rafale par round est suffisamment faible

Objectif 2 : Minimiser P*all*

2.1 Le cas TTP/C

2.2 **Le cas général TDMA**

Mots équilibrés

- Un mot « équilibré » (ou mot de Stürm) est une suite binaire $\{u_n\}_{n\in\mathbb{N}}$ t.q. :

$$\forall k,n,m \in \mathbb{N} \left| \sum_{i=n}^{n+k} u_i - \sum_{j=m}^{m+k} u_j \right| \leq 1$$

- Calcul des mots équilibrés à l'aide des suites crochets :

$$u_n = \left\lfloor n\frac{a}{b} \right\rfloor - \left\lfloor (n-1)\frac{a}{b} \right\rfloor$$

où a/b est la pente du mot (nbre 1/ nbre 0)

- Exemple: mot équilibré de pente 3/8

$$(0,0,1,0,0,1,0,1)$$

Fonction multimodulaire

- Multimodularité [Hajek] : équivalent de la convexité pour les fonctions $f : \mathbb{Z}^m \to \mathbb{R}$

  Définition [Hajek85] : une fonction $f : \mathbb{Z}^m \to \mathbb{R}$ est multimodulaire si

  $$f(x+v)+f(x+w) \geq f(x)+f(x+v+w)$$

  $$x \in \mathbb{Z}^m \text{ et } v, w \in F(\text{une base}),\ v \neq w$$

- Exemple: $x = (0,1,0,1,1,0)$ est une séquence de contrôle, f une fonction de coût et v, w des opérations élémentaires comme le déplacement d'un client vers la gauche $v = (1,-1,0,0,0,0)$

Optimisation et fonction multimodulaire

- Opérateur de décalage global à gauche de i positions: $s_i(x)$

  ex: $s_2\left((0,1,0,1,1,0)\right) = (0,1,1,0,0,1)$

  Théorème [Altman,Gaujal,Hordijk 97]: Si *f* est multimodaire alors $G(x) = 1/m \sum_{i=1}^{m} f(s_i(x))$ (version shift-invariante de *f*) est minimum si x est une séquence balancée.

  Théorème : Si la taille des rafale est exponentiellement distribuée alors P*all* est multimodulaire. Or P*all* est égale à sa version shift invariante donc P*all* est minimale pour une séquence balancée.

Algorithme optimal : une seule FTU

- FTU avec C réplicas de taille h bits dans un round de taille totale R bits
  - Calcul de v_i mot balancé de densité $C/(R-C(h-1))$
  - x est le round initialement vide
  - Si $v_i = 1$ alors $x := x + 1...1$ (h '1' concaténés)
  - Si $v_i = 0$ alors $x := x + 0$

Ex: FTU: 3 replicas de taille 3 sur un round de taille 14

$v_i = (0,0,1,0,0,1,0,1)$ de densité $3/8$

$x = (0,0,1,1,1,0,0,1,1,1,0,1,1,1)$ ($\neq$ mot balancé de densité $9/14$)

Algorithme optimal : plusieurs FTUs

- Problème : conflits entre les allocations

  Ex: FTU A: 3 replicas – FTU B: 2 replicas – FTU C: 1 replica

  $x_A = (0,1,0,1,0,1)$ densité $3/6$

  $x_B = (0,0,1,0,0,1)$ densité $2/6$

  $x_C = (0,0,0,0,0,1)$ densité $1/6$

- Une allocation optimale est néanmoins possible si
  - le nbre de cardinalités des FTU est une puissance de 2
  - tous les réplicas ont la même taille

- Remarque: une séquence équilibrée est minimale pour la majoration, c'est donc la moins bonne solution pour P*one* ! Les objectifs sont antagonistes…

Heuristique : plusieurs FTUs

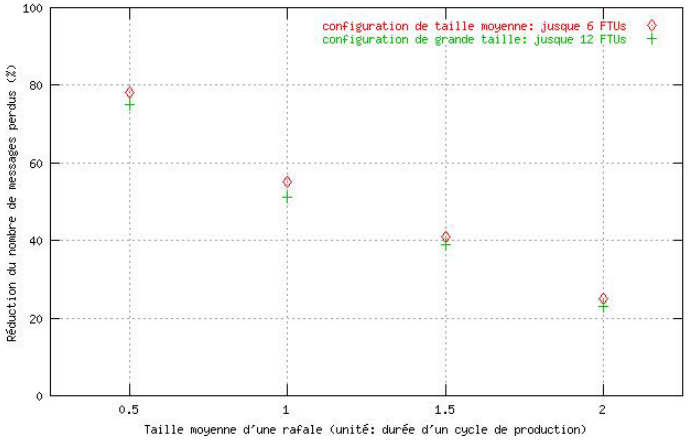
- La « densité » d'émission: quantité de bits d'une FTU A qui doit être émis par bit d'un round

$$d_A = C_A h_A / R$$

- A l'étape i, on décide l'émission d'une trame de la FTU pour laquelle le nombre de bits dus – nombre de bits déjà alloués est maximum

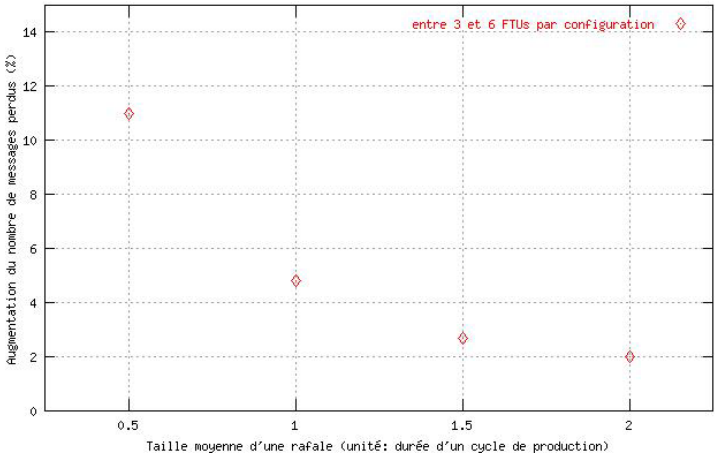
P*all* : Heuristique vs aléatoire

- Réduction du nombre de messages perdus par rapport à une allocation aléatoire:



P*all* : Heuristique vs optimal

- Augmentation du nombre de messages perdus avec l'heuristique par rapport à l'optimal:



Conclusions

- Choix d'une allocation influe fortement sur la robustesse du système sur TDMA –TTP/C
- Allocations optimales ou proches :
  - Pour minimiser Pall, la probabilité que toutes les répliques soient corrompues
  - Pour minimiser Pone, la probabilité qu'une réplique ou plus soit corrompue

Perspectives :

- Configuration mixte fail-silent / non fail-silent (minimiser P*one* et P*all* pour des FTUs différentes)
- Etude du protocole Flexray

Références

- B. Gaujal, N. Navet, *Optimal Replica Allocation for TTP/C based Systems*, à paraître dans IFAC FeT, Juillet 2003.
- B. Gaujal, N. Navet, *Maximizing the Robustness of TDMA Networks with applications to TTP/C*, INRIA RR-4614, 2002.

Convexité - Compléments

Inégalité de convexité :

$$f(\alpha x + (1-\alpha)y) \leq \alpha f(x) + (1-\alpha) f(y) \qquad (1)$$

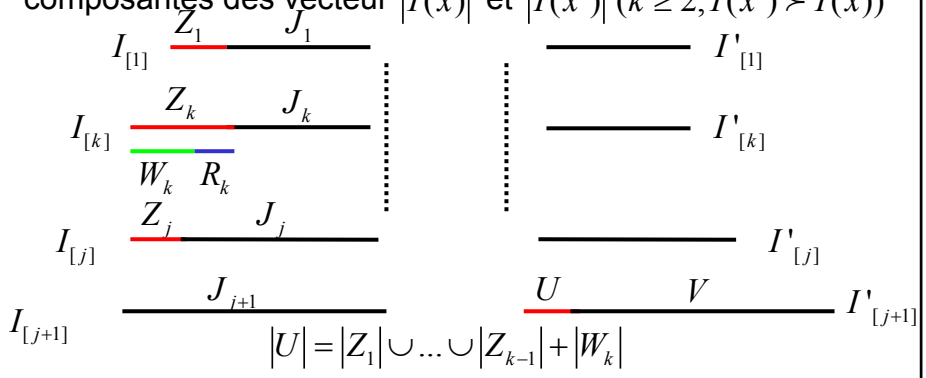
Fonctions convexes entières: satisfont (1) pour α, x et $ax + (1-a)y$ dans Z^n

Problème: pas de garantie qu'un minimum local est un minimum global

➢ Une meilleure notion de convexité est la multimodularité [Hajek 85]

Schur-Concavité de P*one*

- Preuve par couplage avec récurrence sur les composantes des vecteur $|I(x)|$ et $|I(x')|$ $(k \geq 2, I(x') \succ I(x))$



$$|U| = |Z_1| \cup \ldots \cup |Z_{k-1}| + |W_k|$$

$$P_x(U) \leq P_{x'}(Z_1 \cup \ldots \cup Z_{k-1} \cup W_k) \text{ car } |V| \geq |J_i| \text{ pour } i \leq k$$

Fonction multimodulaire

- $x \in \mathbb{N}^m$ modélise une séquence de contrôle

  exemple: $x = (0,1,0,1,1,0)$

- $F \in \mathbb{Z}^m$ est la base : l'ensemble des opérations possibles
  - Ajout d'un client à l'intant m : $e_m = (0,0,0,0,0,1)$
  - Retrait d'un client 1 : $-e_1 = (-1,0,0,0,0,0)$
  - Décalage vers la gauche d'un client : $s_3 = (0,1,-1,0,0,0)$

Définition [Hajek85] : une fonction $f : \mathbb{Z}^m \to \mathbb{R}$ est multimodulaire si

$$f(x+v) + f(x+w) \geq f(x) + f(x+v+w)$$

$$x \in \mathbb{Z}^m \text{ et } v, w \in F,\ v \neq w$$