

Réseaux de communication et Applications de Contrôle-Commande

NGUYEN Xuan Hung

Soutenance de thèse, 15 décembre 2011

LAAS-CNRS, Toulouse, France

Directeurs de thèse

Guy JUANOLE

Professeur Émérite, Université Paul Sabatier, Toulouse

Gérard MOUNEY

Maître de Conférences, Université Paul Sabatier, Toulouse

Rapporteurs

Ye-Qiong SONG

Professeur, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy

Jean-Marc THIRIET

Professeur, Université Joseph Fourier, Grenoble

Examineurs

Germain GARCIA

Professeur, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse

Zoubir MAMMERI

Professeur, Université Paul Sabatier, Toulouse

Yvon TRINQUET

Professeur, Université de Nantes

Cadre de thèse

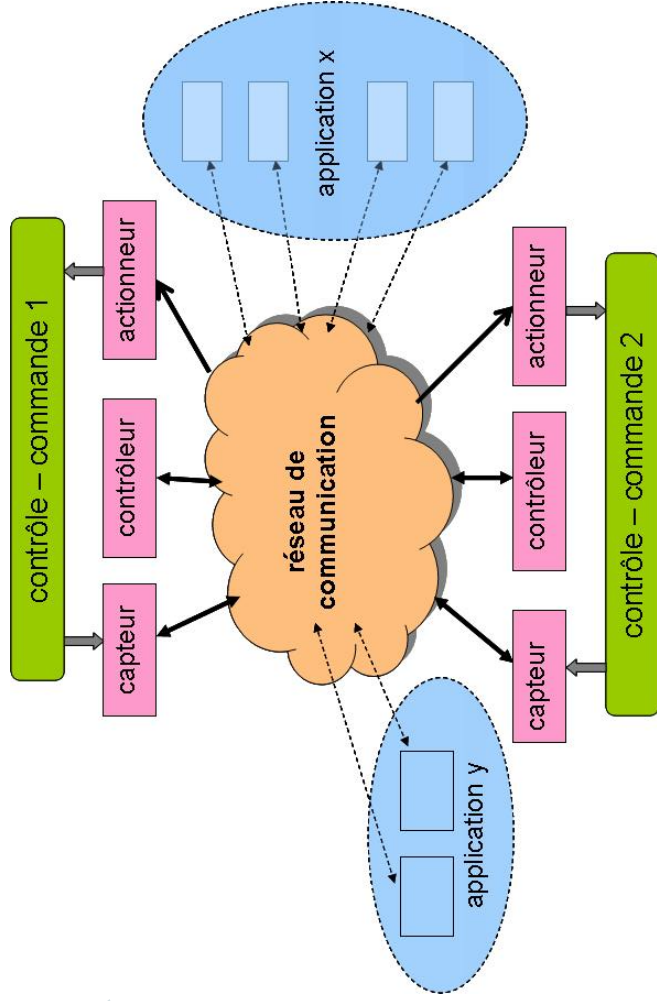
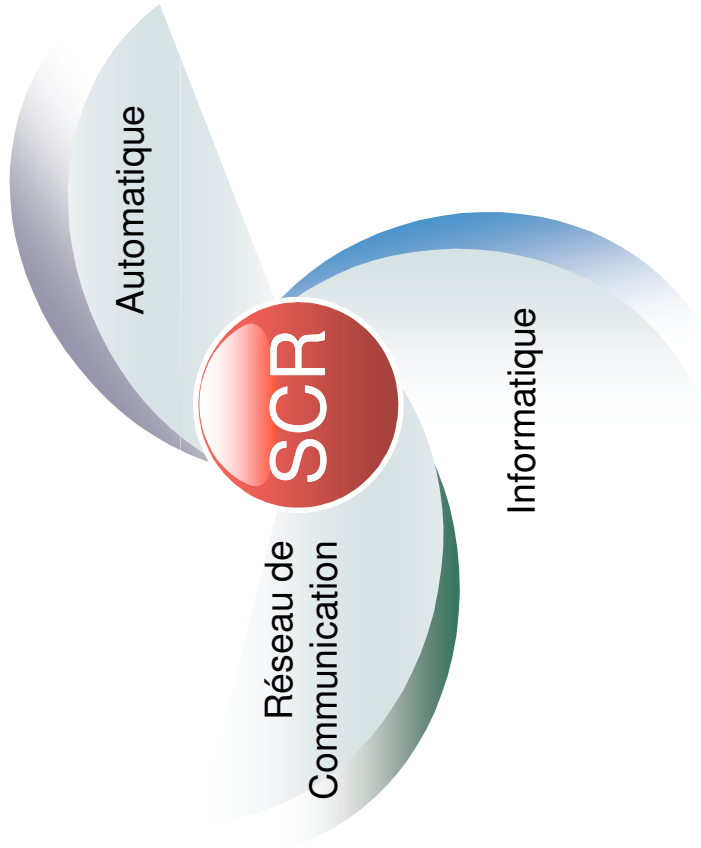
- ❖ Laboratoire accueil
 - **LAAS-CNRS** (Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes), Toulouse
 - Groupes de recherche :
 - OLC (Outils Logiciels pour la Communication)
 - MRS (Modélisation et contrôle des Réseaux et Signaux)
- ❖ Etablissement : INSA (Institut National des Sciences Appliquées) de Toulouse
- ❖ Ecole doctorale : Systèmes (EDSYS)
- ❖ Directeurs de thèse
 - **Guy JUANOLE** : Professeur des universités émérite, UPS, Toulouse
 - **Gérard MOUNEY** : Maître de Conférences, UPS, Toulouse
- ❖ Finances
 - Allocation de recherche (MESR) via INSA Toulouse (36 mois)
 - Contrat CNRS via LAAS-CNRS (2 mois)
- ❖ Dates importantes
 - Date de début : 01/11/2008
 - Date de soutenance : 15/12/2011

Introduction

Systèmes Contrôlés en Réseau (SCR)

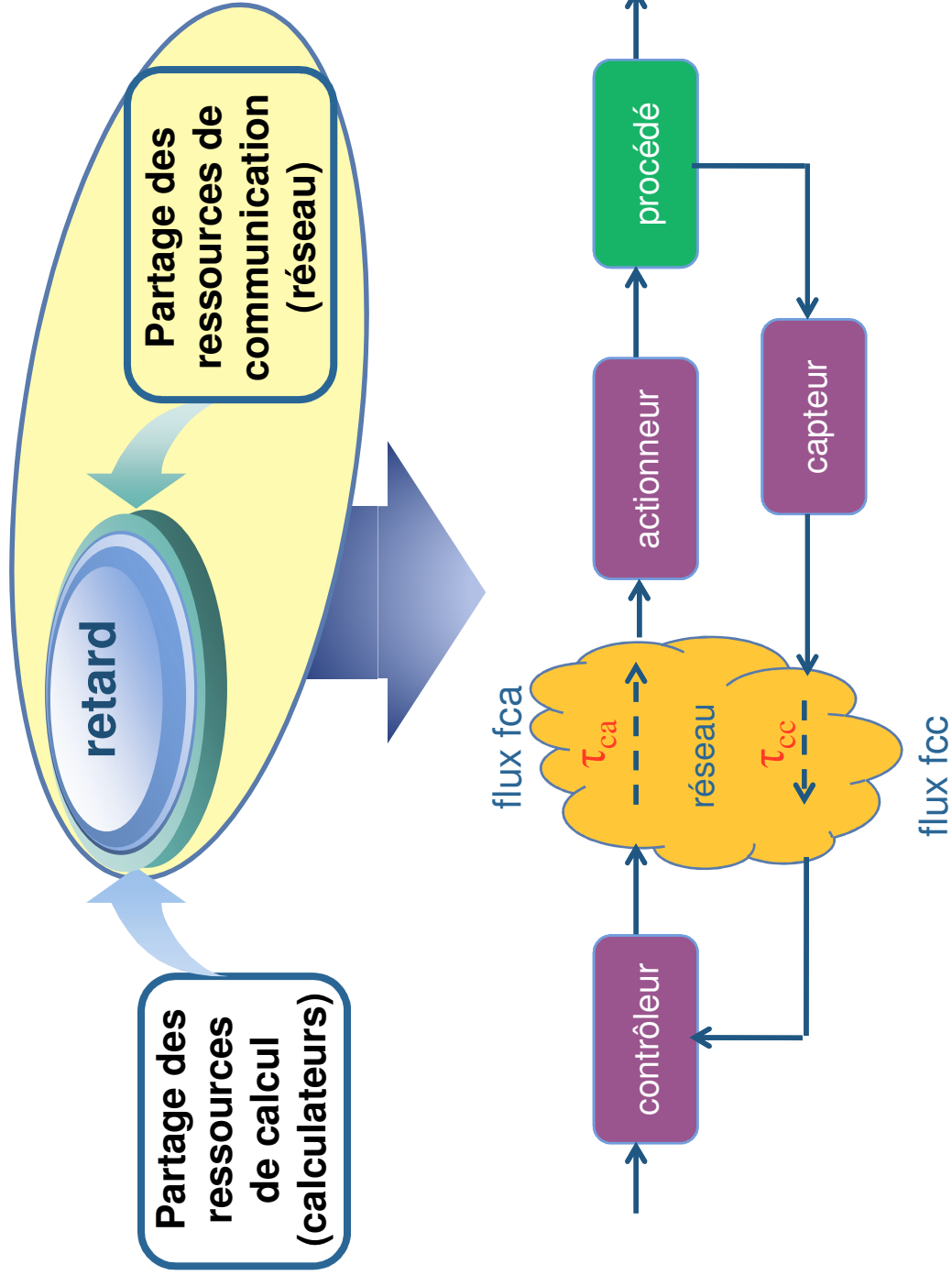
❖ Systèmes pluridisciplinaires

❖ Applications de contrôle-commande en boucle fermée dont les composantes sont connectées par un réseau



Introduction

Problématique : partage de ressources => retard



Introduction

Conception de SCR

- ❖ Avant : conceptions indépendantes (Automatique, Réseau...)
 - => Surdimensionnement
- ❖ Actuellement : Tendances de conception conjointe (co-conception)
 - => Relations Automatique-Réseau

Cadre de notre travail

❖ Conception conjointe Automatique-Réseau (contrôle-ordonnancement de messages)

- Relation Contrôle → Réseau (QdC → QdS)
- Relation Réseau → Contrôle (QdS → QdC)
- Relation Contrôle ↔ Réseau (QdS ↔ QdC)

❖ Réseaux locaux (LAN) considérés

- Réseau filaire : CAN
- Réseau sans fil (WLAN) → technique CSMA => protocole MAC sans collision

QdC : Qualité de Contrôle

QdS : Qualité de Service

CAN : Control Area Network

CSMA : Carrier Sense Multiple Access

Sommaire

0 Introduction

1 Relation QdC $\rightarrow$ QdS sur le réseau CAN [1]

2 Relation QdS $\rightarrow$ QdC sur le réseau CAN

3 Relation bidirectionnelle QdS $\leftrightarrow$ QdC sur le réseau CAN

4 Protocoles MAC de type CSMA sans collision pour WLAN

5 Relation bidirectionnelle QdS $\leftrightarrow$ QdC sur WLAN

6 Conclusion et perspectives

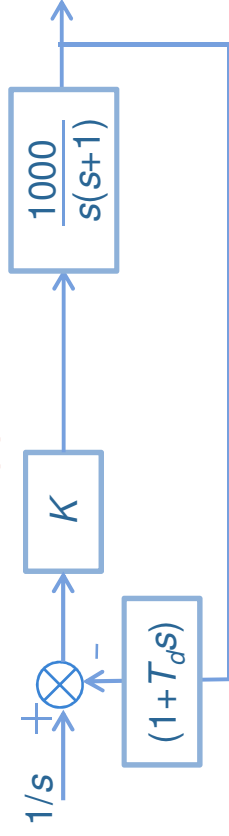
[1]: NGUYEN Xuan et al., WFCs 2010

Relation QdC → QdS (réseau CAN)

Contexte de l'étude

❖ Modèle de l'application de contrôle-commande (notée Appli C-C)

- $K = 1.8$; $T_d = 0.032$ s
 (temps de réponse $t_r = 100$ ms ;
 dépassement $D = 5\%$)



❖ Réseau CAN : débit 125 Kbits/s ; trame f_{cc} et $f_{ca} = 80$ bits (durée $D_{cc} = D_{ca} = 0.64$ ms) ; période d'échantillonnage $h = 10$ ms

❖ Implantations considérées

- Une Appli C-C + un flux externe (f_{ex}) périodique synchrone avec f_{cc}
 - trame du flux externe $f_{ex} = 120$ bits ($D_{ex} = 0.96$ ms), période T_{ex}
 - charge du réseau : $TRU = \frac{D_{cc}}{h} + \frac{D_{ca}}{h} + \frac{D_{ex}}{T_{ex}}$

- Plusieurs Appli C-Cs identiques : $P_1, P_2, \dots, P_n$: les flux f_{cc} sont synchrones

❖ QdC : critère de performance ITSE $J = \int_0^T t(r(t) - y(t))^2 dt \rightarrow J_0 \rightarrow \frac{J - J_0}{J_0} \% = \frac{\Delta J}{J_0} \%$

❖ Simulateur TrueTime (Appli C-C ; Réseau)

Relation QdC → QdS (réseau CAN)

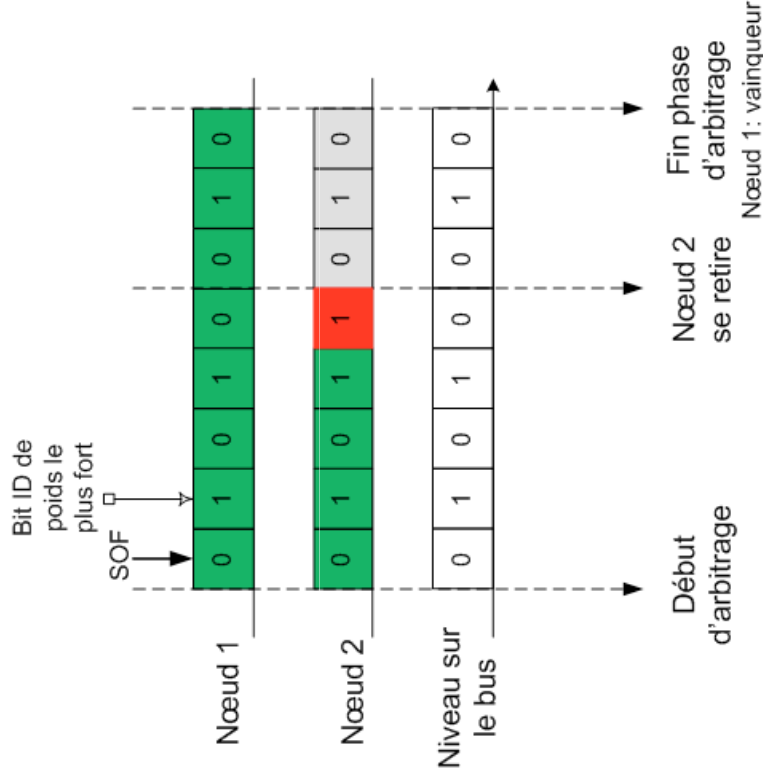
Réseau CAN et mécanisme d'accès

❖ Technique d'accès

- CSMA/CA à priorité
- Priorité portée par le champ ID
- Priorité statique
- Notion de bit : bit dominant (0), bit récessif (1)

❖ Arbitrage

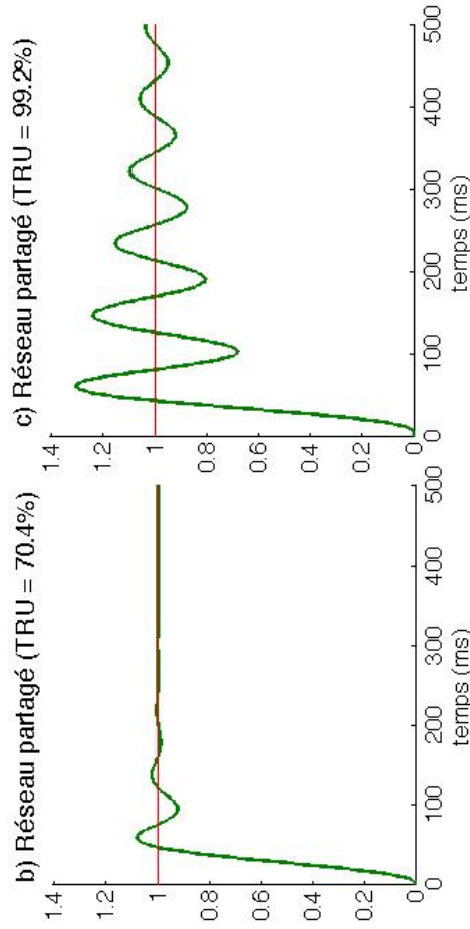
- comparaison bit à bit du champ ID à partir du bit de poids le plus fort
- bit dominant écrase bit récessif
- un seul vainqueur après l'arbitrage car l'unicité de ID



Relation QdC → QdS (réseau CAN)

Résultat de travaux basés sur les priorités statiques

- ❖ Appli C-C : priorité du contrôleur (Pca) > priorité du capteur (Pcc)
- ❖ Appli C-C et flux externe
 - Si priorité du fex (Pex) < Pca => application implantable
 - Si Pex > Pca et si charge réseau importante => application non implantable

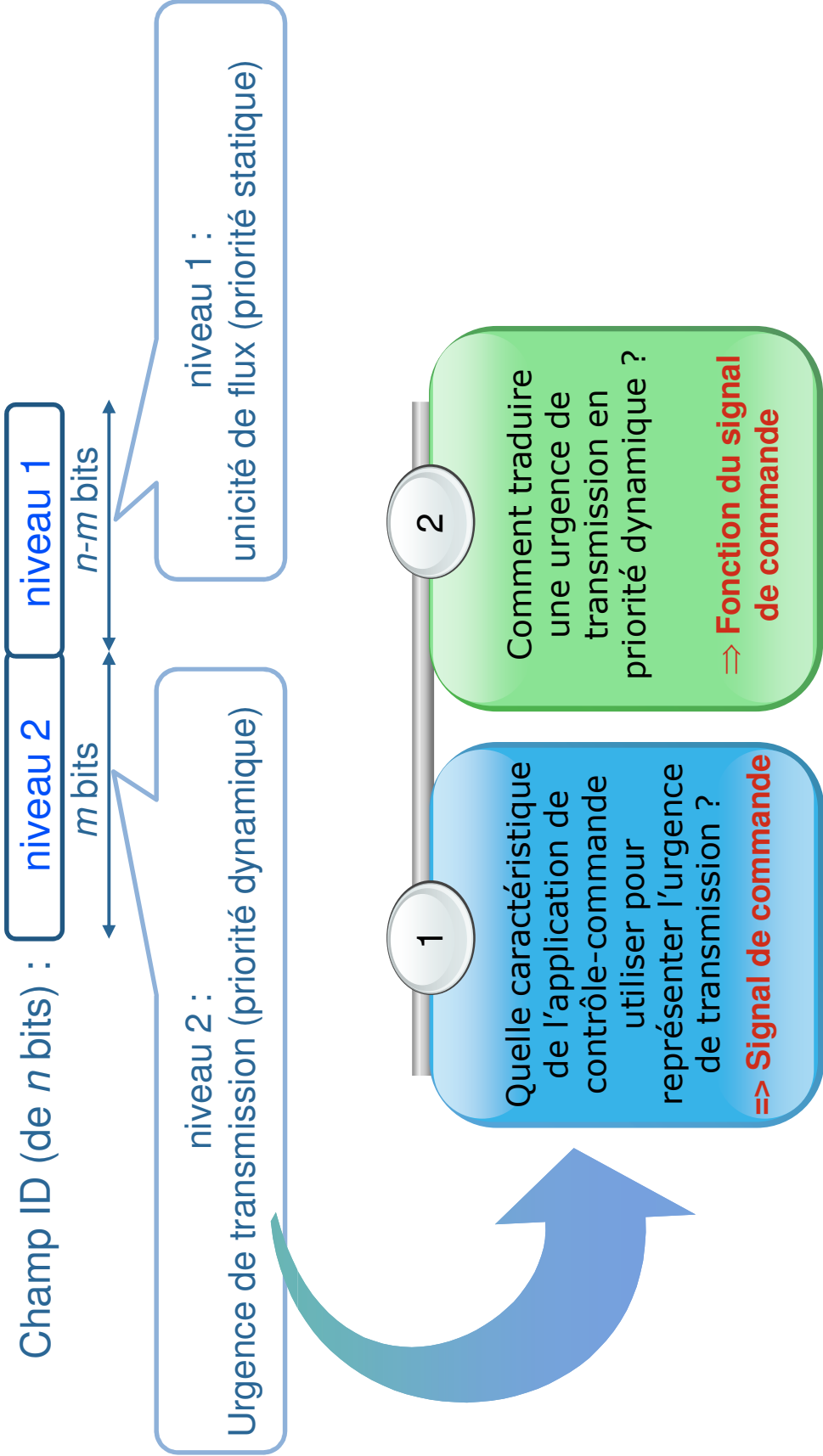


- ❖ D'où idée pour Appli C-C (régime transitoire : urgence forte de transmission ; régime permanent : urgence faible de transmission)
 => priorité hybride = priorité du flux (unicité) + priorité de l'urgence

Relation QdC → QdS (réseau CAN)

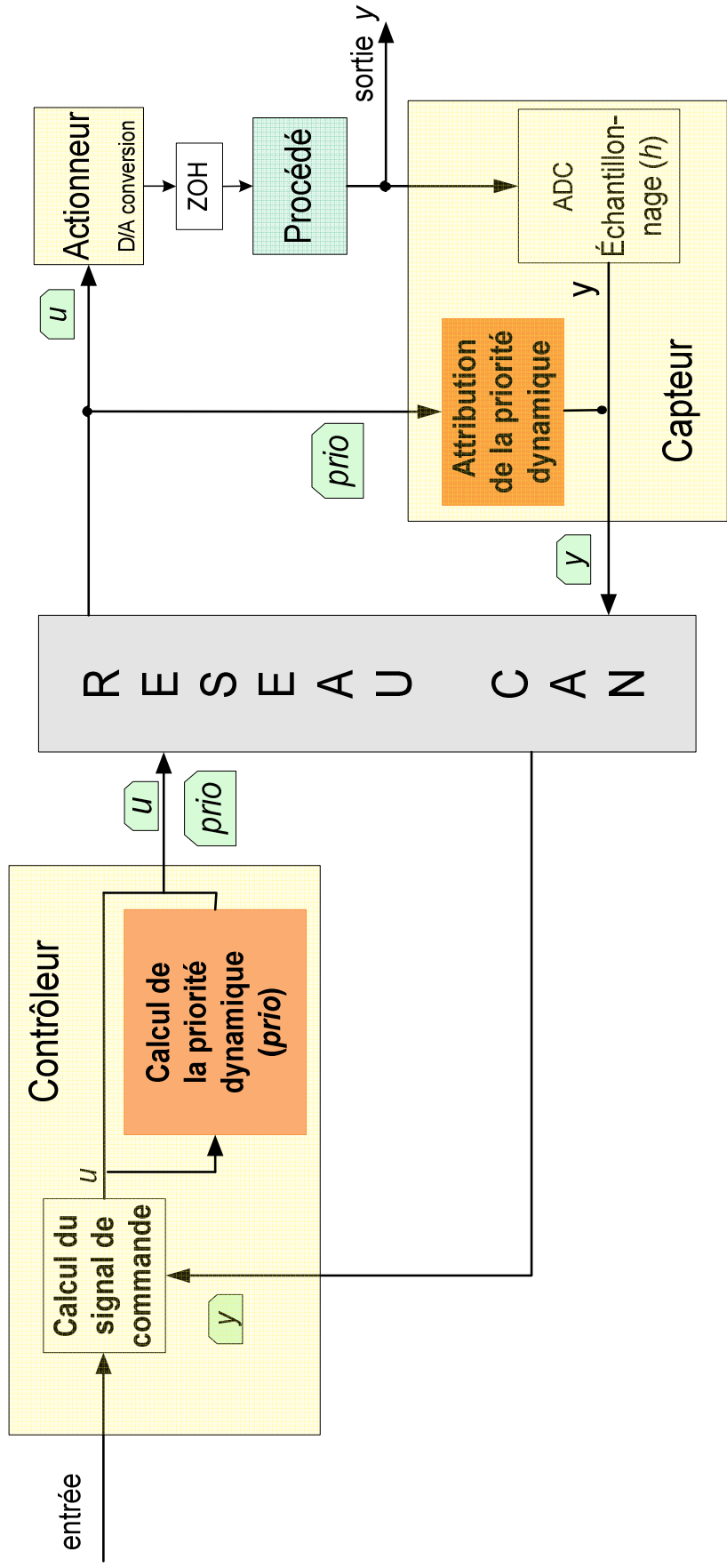
Idée de la priorité hybride

hybride = dynamique + statique



Relation QdC → QdS (réseau CAN)

Implantation de la priorité dynamique



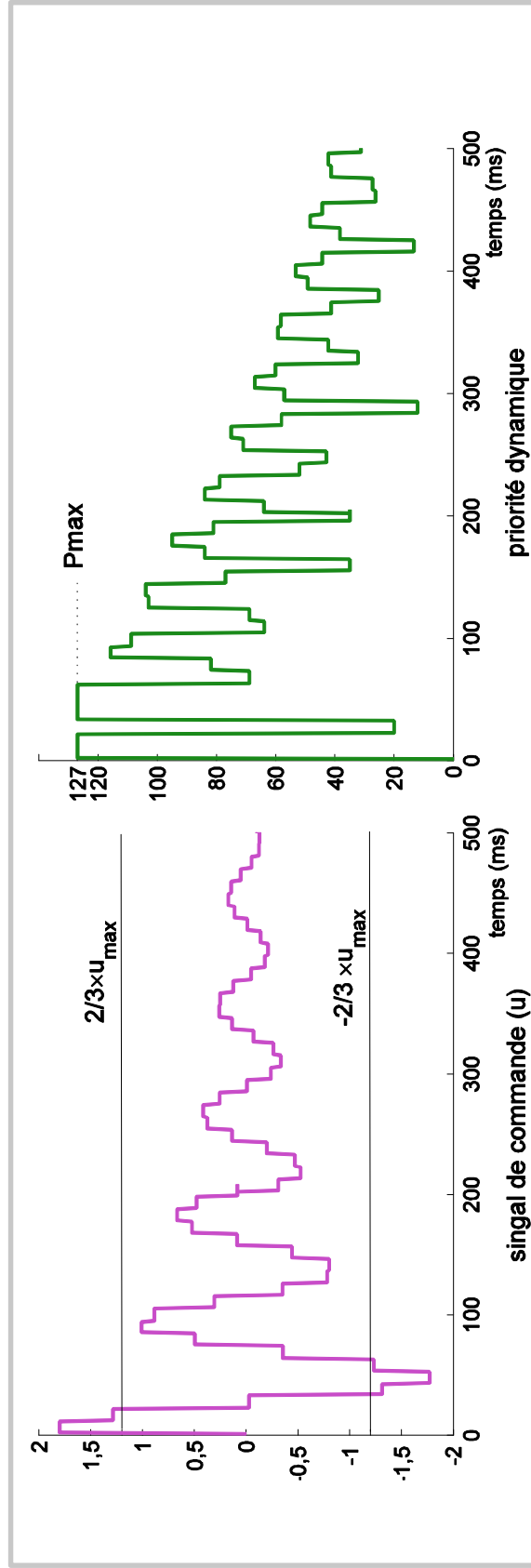
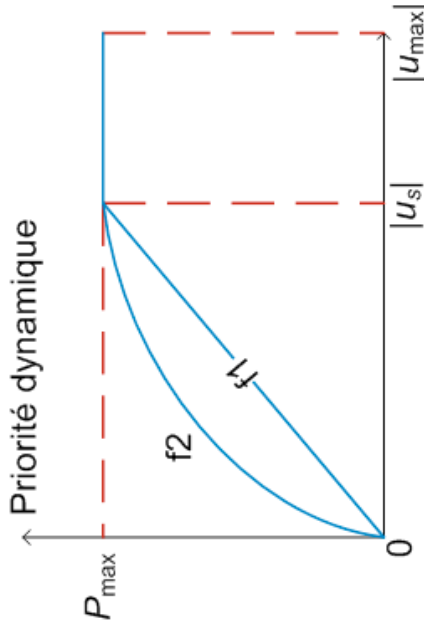
- Contrôleur calcule la priorité dynamique
- Capteur utilise la priorité dynamique calculée par le contrôleur dans la période précédente
- 1^{re} période : capteur utilise la priorité dynamique max

Relation QdC → QdS (réseau CAN)

Trois schémas de priorité hybride

❖ Schéma ph (priorité hybride)

- La priorité dynamique = fonction croissante du signal de commande u
- La priorité dynamique réévaluée à chaque période d'échantillonnage



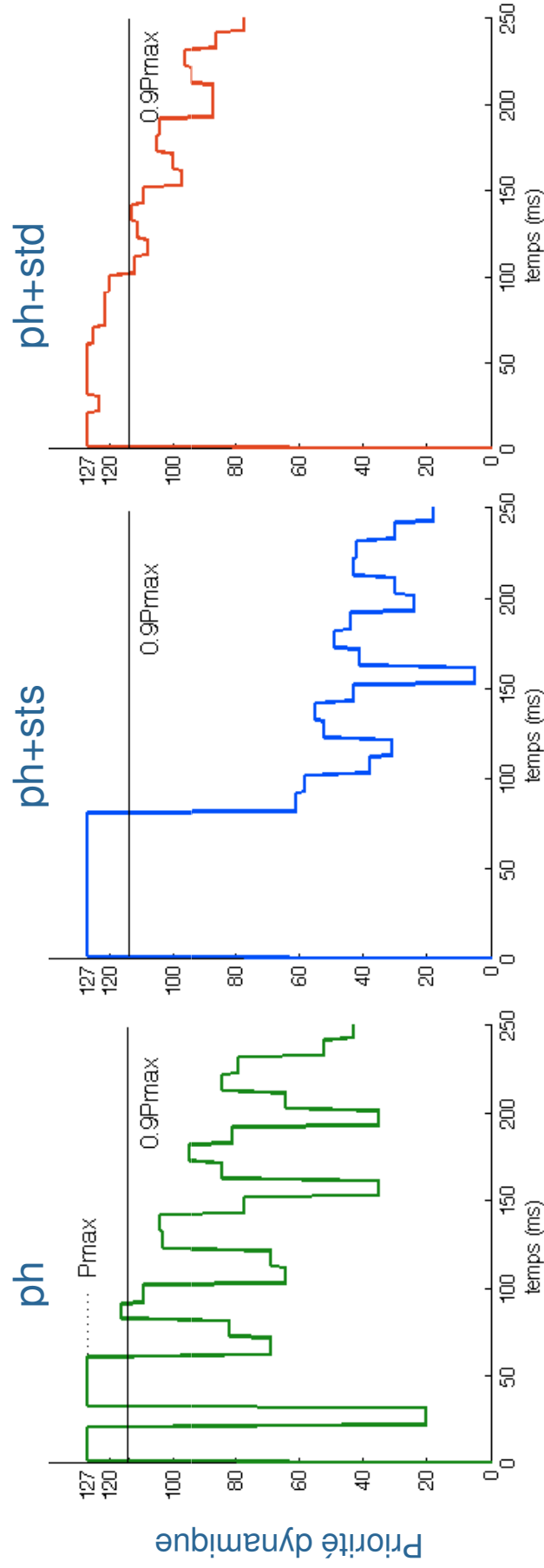
une application + 1 flux externe f_{ex} : TRU = 99.2% ; besoin (niveau 2) du flux externe $f_{ex} = 0.9P_{\max}$

Relation QdC → QdS (sur réseau CAN)

Considération de trois schémas de priorité hybride

une application + 1 flux externe f_{ex} :

TRU = 99.2% ; besoin (niveau 2) du flux externe $f_{ex} = 0.9P_{max}$



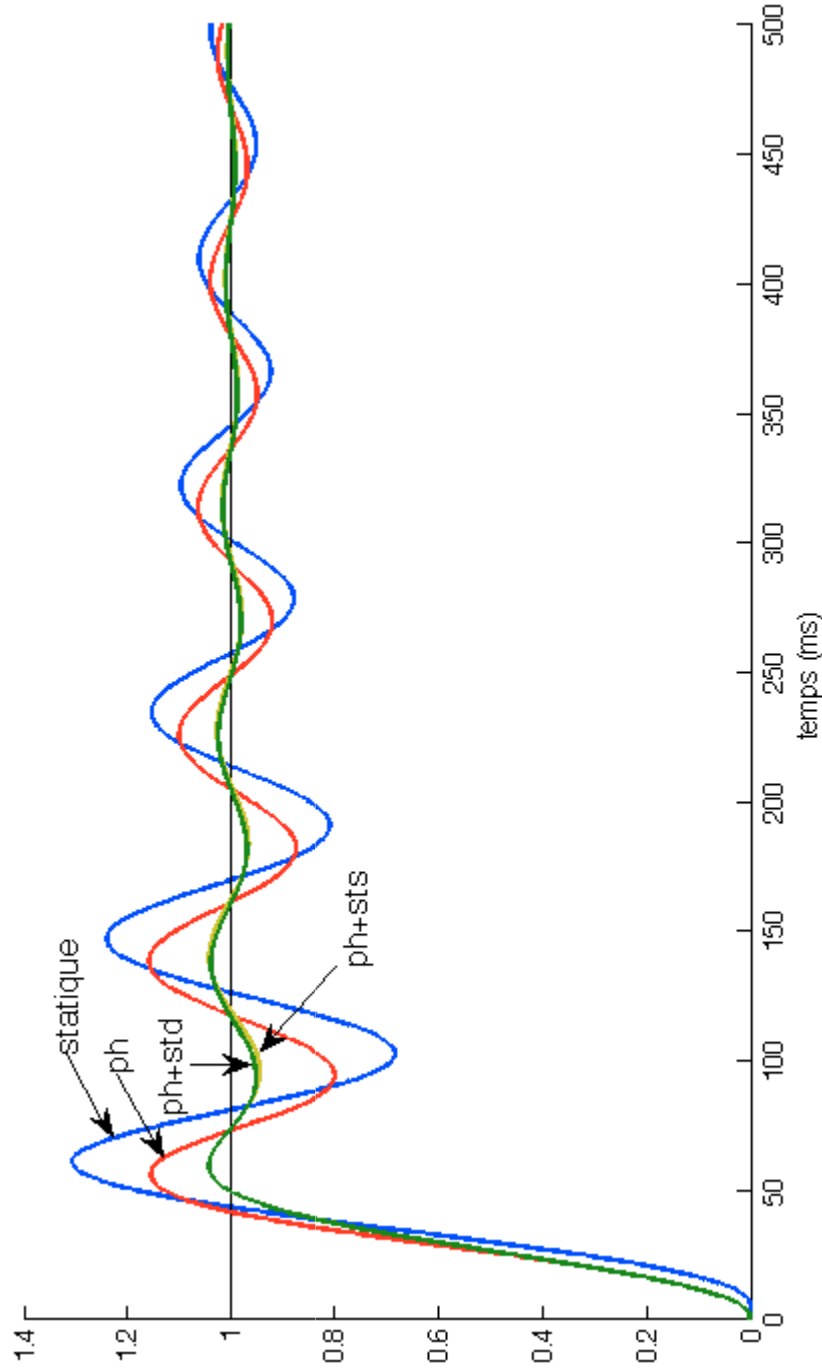
ph+sts : ph+ stratégie temporelle statique
 ph+std : ph+ stratégie temporelle dynamique

Relation QdC → QdS (sur réseau CAN)

Réponses temporelles

une application + 1 flux externe f_{ex} :

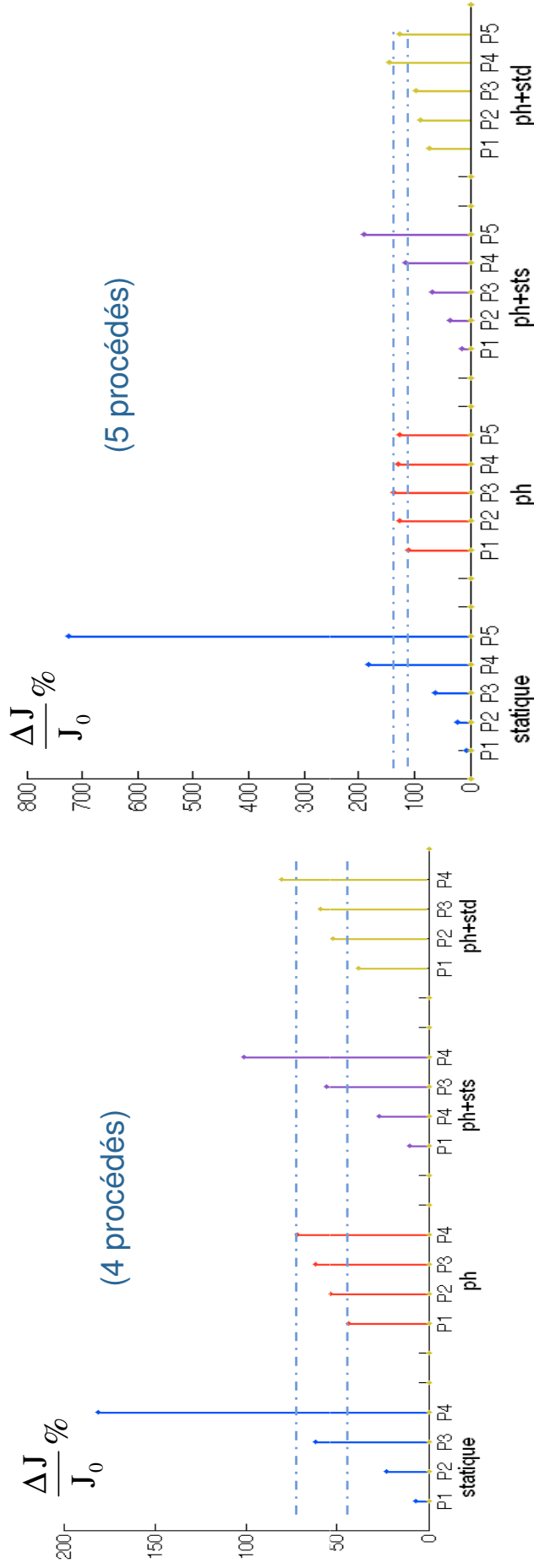
(TRU = 99.2% ; besoin (niveau 2) du flux externe $f_{ex} = 0.9P_{max}$)



Relation QdC → QdS (sur réseau CAN)

Plusieurs applications de contrôle-commande

$$(Pca1 > Pca2 > Pca3 > Pca4 > Pca5 > Pcc1 > Pcc2 > Pcc3 > Pcc4 > Pcc5)$$



❖ **Priorité Statique** : dégradation de performance liée à l'ordre de la priorité

❖ **Priorités Hybrides**

- **ph** : le meilleur équilibre de performance
- **ph+sts** : tendance comportementale de type des priorités statiques (influence de la partie statique)
- **ph+std** : compromis entre ph et ph+sts

Relation QdC → QdS (sur réseau CAN)

Conclusion

- ❖ Intérêt du concept de priorité hybride pour les Appli C-Cs
- ❖ Trois schémas ont été proposés : ph ; ph+sts ; ph+std
- ❖ Considération d'une seule application : ph+std a la meilleure QdC
- ❖ Considération d'un ensemble d'applications : ph donne le meilleur équilibre de performance
- ❖ Schéma ph utilisé dans la suite du travail

Sommaire



[2]: NGUYEN Xuan, ETFA 2011

Relation QdS → QdC (sur réseau CAN)

Introduction

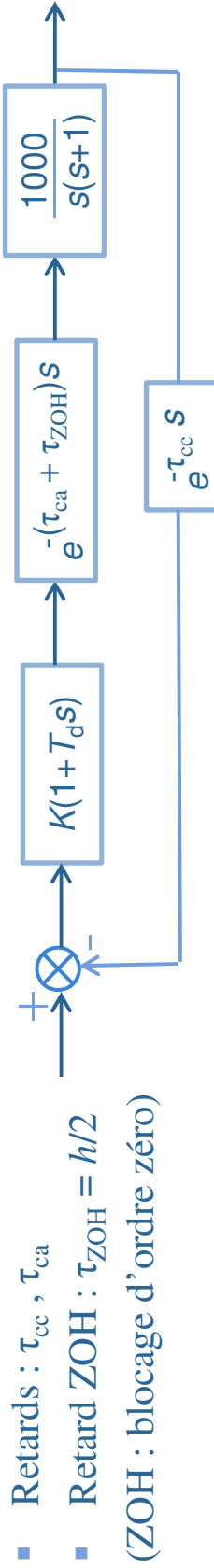
❖ Objectif : modification des paramètres du contrôleur en prenant en compte du retard de la boucle (*i.e.* compensation des retards)

❖ Modèle (sans retard) :

- $K = 0.7291$; $T_d = 0.0297$ (marge de phase 45°)
- Pôles : $p_{1,2} = 11 \pm j24.5$
- Fonction de transfert :

$$F(s) = \frac{1000K(1+T_d s)}{s^2 + (1+1000KT_d)s + 1000K} = \frac{\omega_n^2(1+T_d s)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

❖ Intégration des retards dans le modèle



❖ Méthode de compensation : pôles dominants

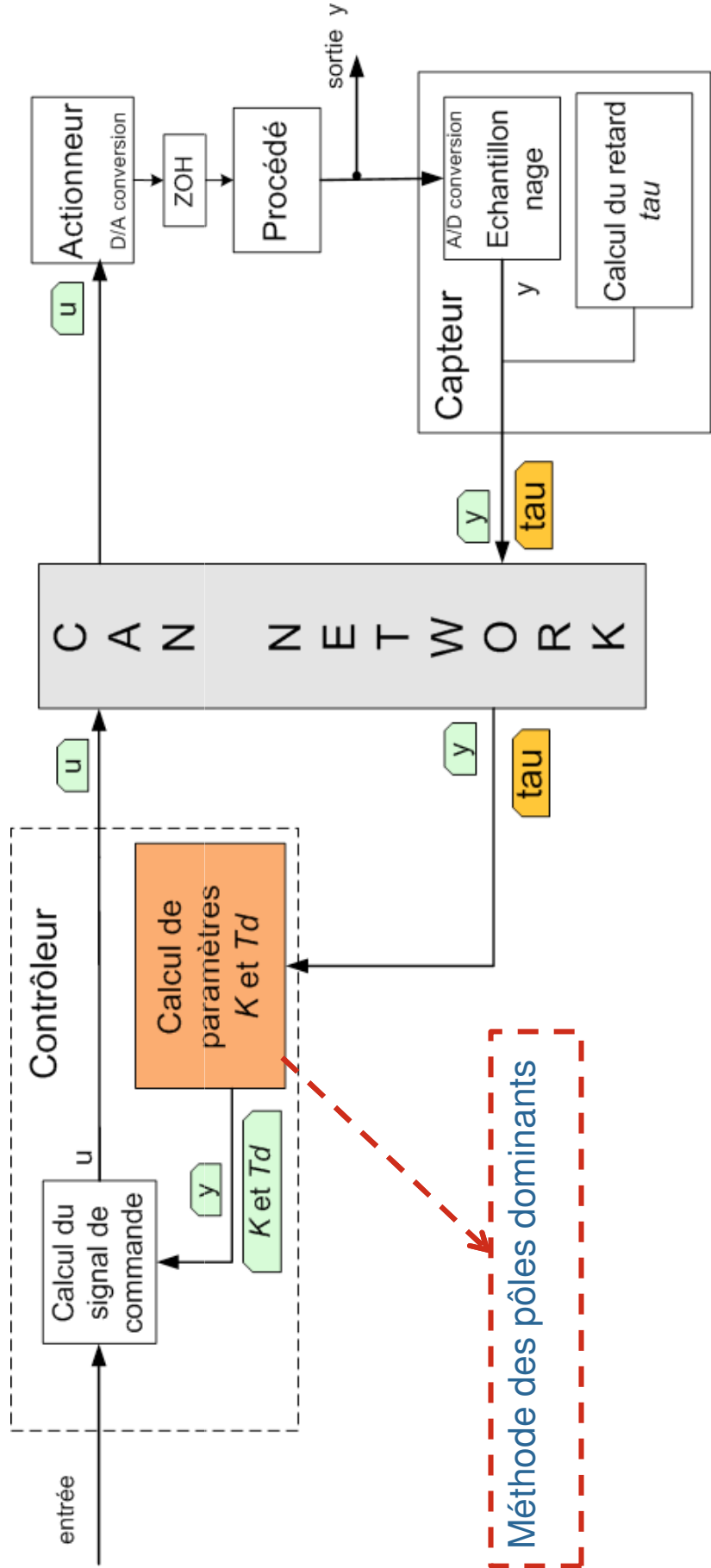
- Modification de K et T_d en fonction du retard pour avoir les mêmes pôles du système continu initial (les autres pôles devraient être négligés)

❖ Hypothèses : priorités statiques + réseau non surchargé

Relation QdS → QdC (sur réseau CAN)

Implantation de la relation QdS → QdC [2]

- Capteur calcule le retard τ ($= \tau_{cc} + \tau_{ca}$) et l'envoi au contrôleur
- Contrôleur prend le retard et calcule les paramètres
- Hypothèse : actionneur et capteur dans le même site

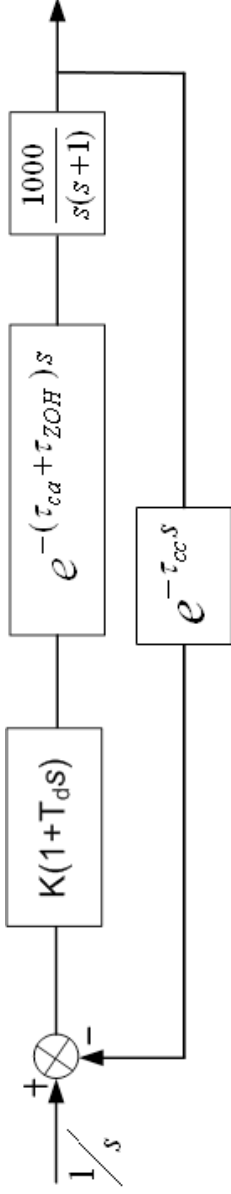


tau Retard de la boucle

[2]: NGUYEN Xuan, ETFA 2011

Relation QdS → QdC (sur réseau CAN)

Méthode des pôles dominants



$$F(s) = \frac{K(1+T_d s) e^{-(\tau_{ca} + \tau_{zoh})s} \frac{1000}{s(s+1)}}{1 + K(1+T_d s) e^{-s} \frac{1000}{s(s+1)}}$$

$$\text{Padé approximation } e^{-s} \approx \frac{\frac{\tau}{2}s + 1}{\frac{\tau}{2}s + 1} \quad \text{et} \quad e^{-\frac{-(\tau_{ca} + \tau_{zoh})s}{2}} \approx \frac{\frac{(\tau_{ca} + \tau_{zoh})}{2}s + 1}{\frac{(\tau_{ca} + \tau_{zoh})}{2}s + 1}$$

Avec $a = \frac{2}{\tau}$ $b = \frac{2}{(\tau_{ca} + \tau_{zoh})}$

$$F(s) = \frac{1000Ka(1+T_d s)(\frac{s}{a} + 1)(-\frac{s}{b} + 1)}{(s^3 + (1+a-1000KT_d)s^2 + (1000KT_d a + a - 1000K)s + 1000Ka)(-\frac{s}{b} + 1)}$$

$$(s - p_1)(s - p_2)(s - p_3) = s^3 - (2R + p_3)s^2 + (2Rp_3 + R^2 + I^2)s - (R^2 + I^2)p_3 \quad \text{où } p_{1,2} = -R \pm jI \quad (R=11 ; I=24)$$

On trouve :

$$\begin{cases} p_3 = -\frac{a^3 + (2+2R)a^2 - (R^2 + I^2)a}{a^2 - 2Ra + R^2 + I^2} \\ K = -\frac{(R^2 + I^2)p_3}{1000a} \\ T_d = \frac{1+a+p_3+2R}{1000K} \end{cases}$$

$$\Rightarrow F(s) = \frac{\omega_n^2(1+T_d s)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \times \frac{(\frac{s}{a} + 1)(-\frac{s}{b} + 1)}{(\frac{s}{b} - 1)(-\frac{s}{b} + 1)}$$

$$\Rightarrow F(s) = \frac{\omega_n^2(1+T_d s)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad \text{avec } T_d = \text{fonction de retard}$$

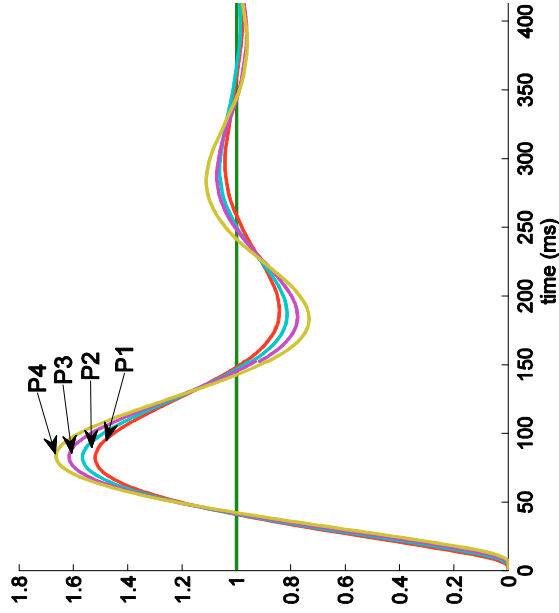
Remarque : T_d augmente avec retard $\Rightarrow$ zéro $z = -1/T_d$ approche de l'origine $\Rightarrow$ ceci augmente le dépassement

Relation QdS → QdC (sur réseau CAN)

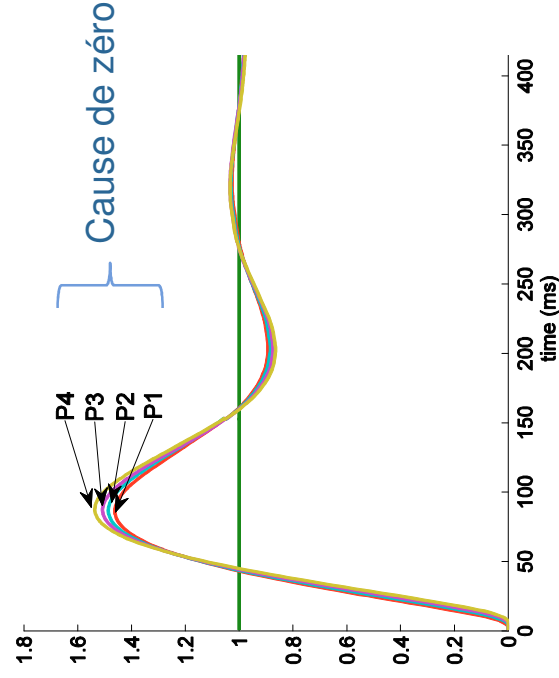
Résultats

- ❖ Implantation de 4 Appli C-Cs ;
priorités statiques : $Pca1 > Pca2 > Pca3 > Pca4 > Pcc1 > Pcc2 > Pcc3 > Pcc4$
- ❖ Visualisation de l'influence de la compensation des retards
 - Contrôleur fixe : pas de modification de K et T_d
 - Contrôleur adaptatif : K et T_d sont modifiés par la méthode des pôles dominants

Contrôleur fixe



Contrôleur adaptatif



Conclusion

- ❖ Mise en œuvre de la relation $QdS \rightarrow QdC$: méthode des pôles dominants
=> amélioration de la QdC
- ❖ Implantation de plusieurs applications : pas de performances identiques
pour les applications à cause du zéro ($z = -1/T_d$)

Sommaire



[3]: NGUYEN Xuan et al., WFCs 2012 (soumis)

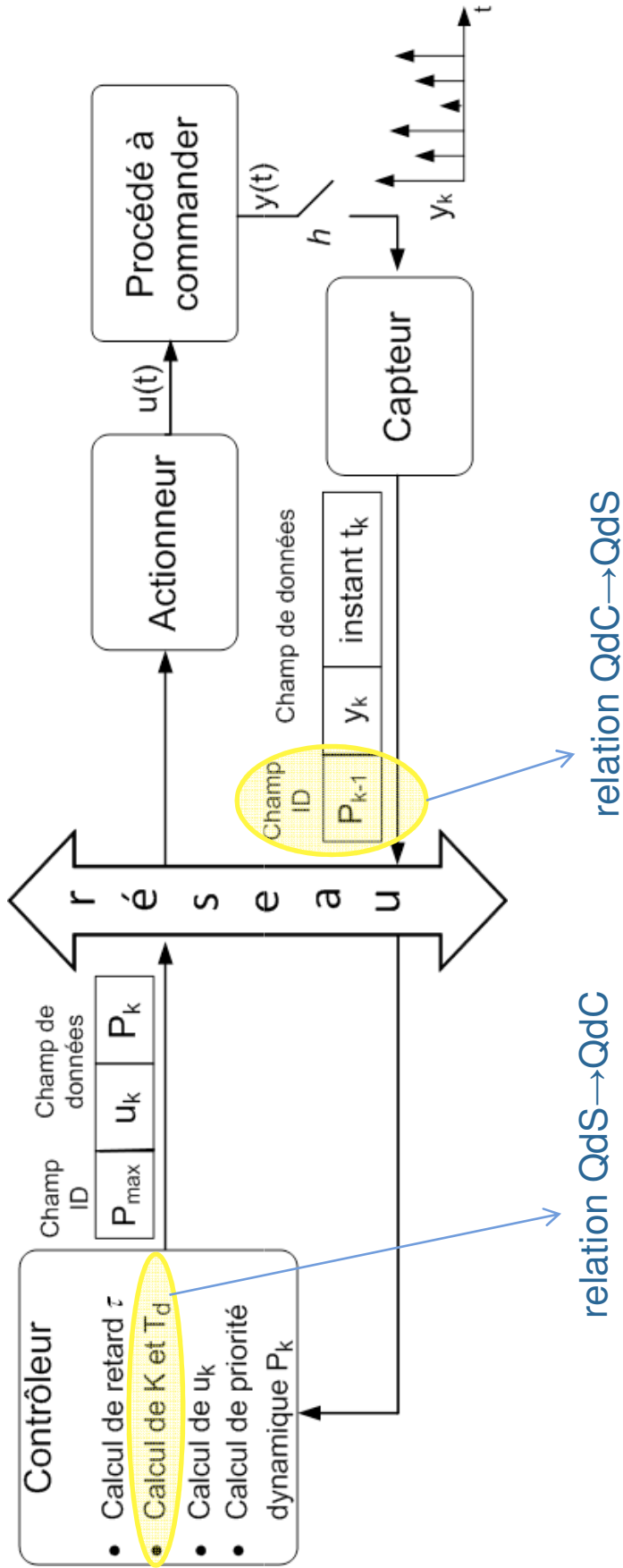
Relation QdS ↔ QdC (sur réseau CAN)

Introduction

- ❖ Objectif : Combinaison des relations $QdC \rightarrow QdS$ et $QdS \rightarrow QdC$
- ❖ Problème : priorité hybride $\Rightarrow$ retard variable $\Rightarrow$ relation $QdS \rightarrow QdC$ définie ne peut pas être implantée
- ❖ Solution ? Implémentabilité si le contrôleur connaît le retard de la période actuelle
- ❖ Les retards de la période actuelle :
 - τ_{cc} peut être calculé par le contrôleur
 - τ_{ZOH} est toujours fixe ($= h/2$)
 - τ_{ca} est maintenant inconnu $\Rightarrow$ il faut l'anticiper
- ❖ Proposition : contrôleur utilise la priorité dynamique maximale
 - $\Rightarrow$ envoi immédiat (temps de calcul est négligé)
 - $\Rightarrow \tau_{ca}$ est égal à la durée de transmission de la trame du contrôleur ($\tau_{ca} = D_{ca}$)
 - $\Rightarrow$ Retard de la boucle est disponible au site Contrôleur
 - $\Rightarrow$ Relation $QdS \rightarrow QdC$ (méthode des pôles dominant) est implémentable
- ❖ Notons schéma ph^+ = schéma ph avec P_{max} pour contrôleur

Relation QdS ↔ QdC (sur réseau CAN)

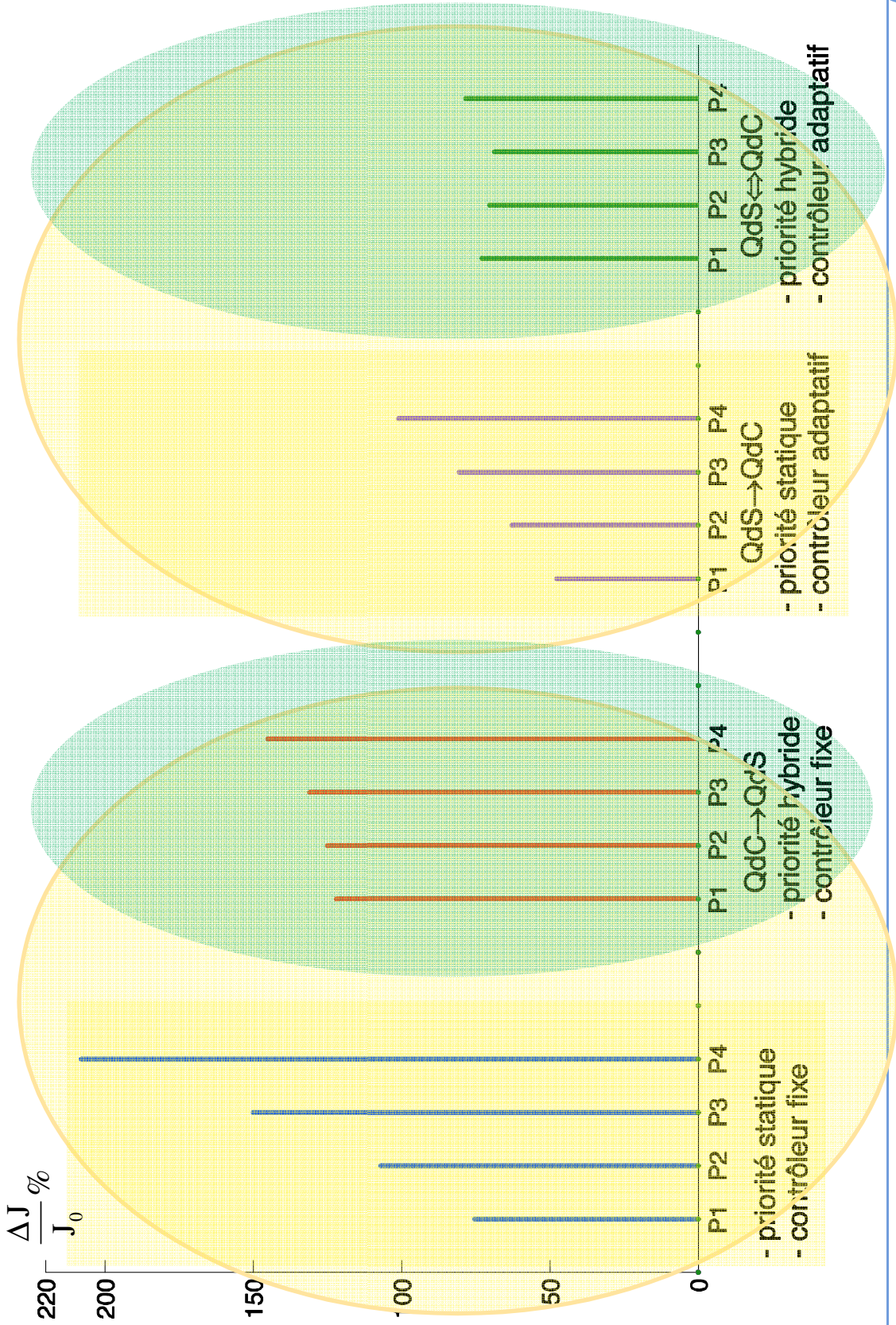
Implantation de la relation QdS ↔ QdC [3]



[3]: NGUYEN Xuan et al., WFCs 2012 (soumis)

Relation QdS ↔ QdC (sur réseau CAN)

Résultats : récapitulation



Conclusion sur le réseau CAN

On a montré la faisabilité de la mise en œuvre de la conception conjointe en utilisant la priorité hybride pour l'ordonnancement de messages et la méthode des pôles dominants pour la compensation de retard.

Sommaire



^[4] : NGUYEN Xuan et al., GLOBECOM – SaCoNAS 2010 ; ^[5] : NGUYEN Xuan et al., ETR 2011

Protocole MAC de type CSMA sans collision pour WLAN

Introduction

- ❖ Strict CSMA : potentialité de situation de collision
- ❖ Situation de collision due à l'ambiguïté de l'expression $<< \text{médium libre à un temps } t >>$ car vue locale de l'état du médium (pas de vue globale)
- ❖ Le concept de $<< \text{fenêtre d'ambiguïté } >> = \text{durée maximale possible entre l'envoi d'une trame par un nœud et l'occurrence d'une collision sur cette trame.}$
- ❖ Objectif d'un protocole sans collision : supprimer les situations de collision en utilisant les priorités
c.-à-d. Transformer situations de collision $\rightarrow$ situations $<< \text{vainqueur-vaincu(s)} >>$

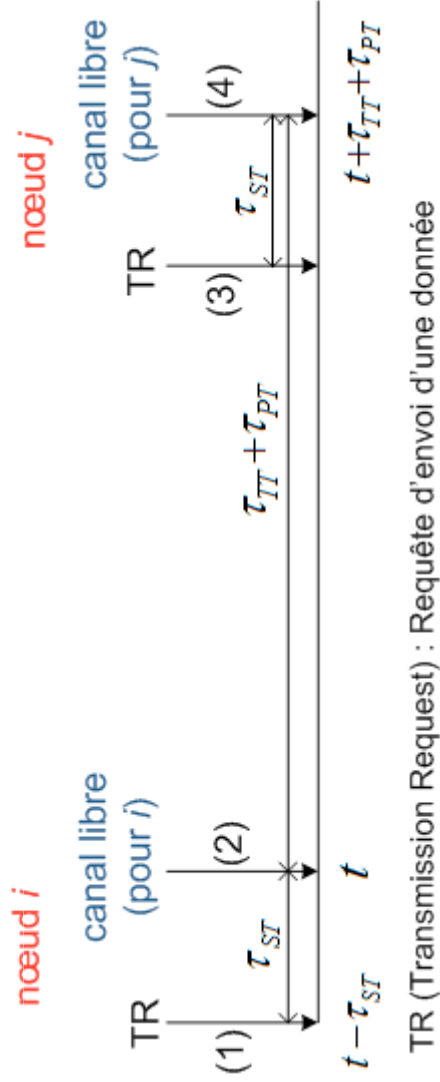
Protocole MAC de type CSMA sans collision pour WLAN

Fenêtre d'ambiguïté

❖ Éléments importants de la couche physique :

- temps de propagation : τ_{PT}
- temps de retournement : τ_{TT}
- temps de détection (sensing time) : τ_{ST}

❖ Visualisation de la fenêtre d'ambiguïté



❖ Largeur de la fenêtre d'ambiguïté = $\tau_{TT} + \tau_{PT}$

Protocole MAC de type CSMA sans collision pour WLAN

Protocoles MAC à priorité : 2 approches

- ❖ Technique BlackBurst
 - messages d'annonce (messages BlackBurst) envoyés avant les trames
 - longueur de messages d'annonce proportionnelle à la priorité
- ❖ Adaptation du protocole CAN au réseau sans fil (appelé CANlike)
- ❖ Ici on ne présente que CANlike

Protocole MAC de type CSMA sans collision pour WLAN

CANlike (1)

Adaptation du protocole CAN au contexte sans fil (1)

❖ Problème

- dans réseau sans fil, on ne peut pas émettre et écouter en même temps

❖ Solution

- bit dominant : porteuse (signal d'énergie) émise sur canal
- bit récessif : écoute du canal

❖ Tournoi

- bit dominant : il émet une porteuse et continue le tournoi avec le bit suivant du champ ID (nœud gagnant par définition)
- bit récessif : nœud écoute le canal
 - s'il détecte la porteuse (donc est perdant et ne continue pas)
 - s'il ne détecte rien (pas de bit dominant émis par un autre nœud) , il continue le tournoi

Protocole MAC de type CSMA sans collision pour WLAN

CANlike (2)

- ❖ Nécessité d'un signal de synchronisation avant le tournoi
 - annoncer aux autres nœuds l'arrivée des bits du champ ID
- ❖ Nécessité d'un temps de garde (t_g) après signal de synchronisation et bit ID
- ❖ Il faut déterminer les durées du signal de synchronisation (l_s), de bit ID (l_b) et du temps de garde (t_g)

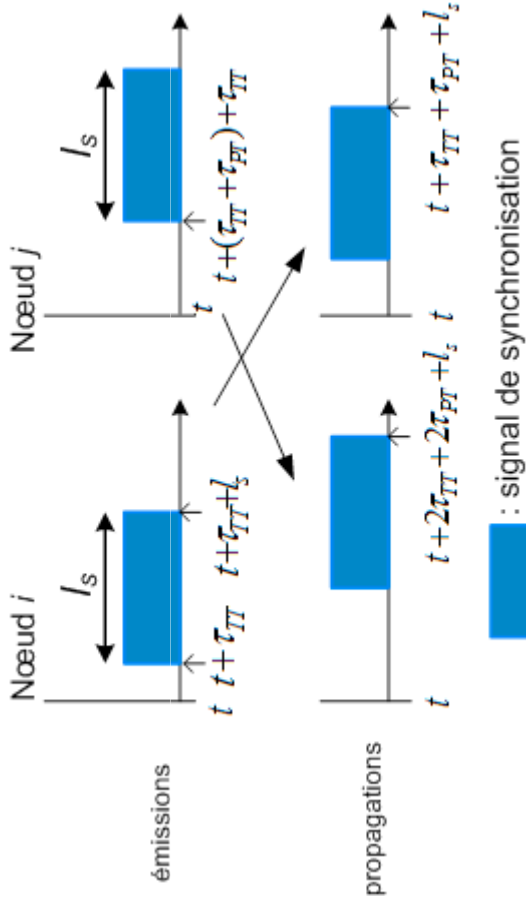
Protocole MAC de type CSMA sans collision pour WLAN

CANlike (3)

Evaluation du temps de garde (t_g)

❖ Situation

- Nœud i décide d'envoyer l_s à l'instant t
- Nœud j décide d'envoyer l_s à l'instant $t + (\tau_{TT} + \tau_{PT})$ (décalage = largeur de la fenêtre)



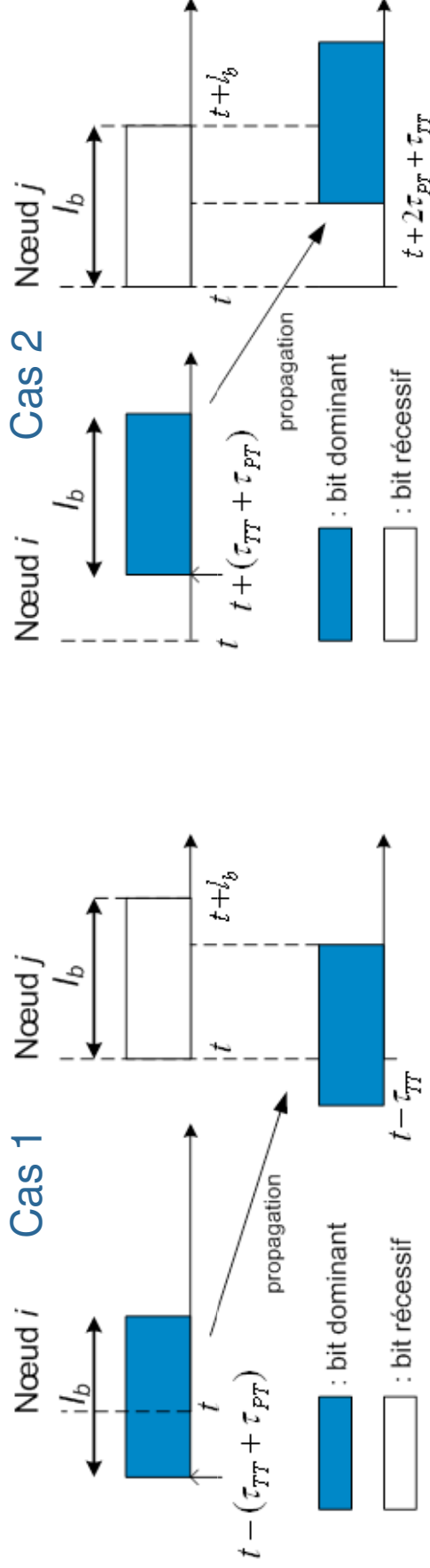
- ❖ Temps de garde = dépassement du signal l_s envoyé par nœud i par la propagation du signal l_s envoyé par nœud $j \Rightarrow t_g = 2\tau_{PT} + \tau_{TT}$
- ❖ Durée de l_s : il doit être détecté $\Rightarrow l_s \geq \tau_{ST}$

Protocole MAC de type CSMA sans collision pour WLAN

CANlike (4)

Evaluation des bits du champ ID (l_b), durée l_s

- ❖ Scénario : un nœud a un bit dominant ; un nœud a un bit récessif (écoute)



- ❖ Contrainte : nœud j doit détecter le signal venant de nœud i

$$\text{Cas 1 : } l_b \geq \tau_{TT} + \tau_{ST} \quad \text{Cas 2 : } l_b \geq 2\tau_{PT} + \tau_{TT} + \tau_{ST} \quad \Rightarrow l_b = 2\tau_{PT} + \tau_{TT} + \tau_{ST}$$

- ❖ Remarque : on prend $l_s = l_b$

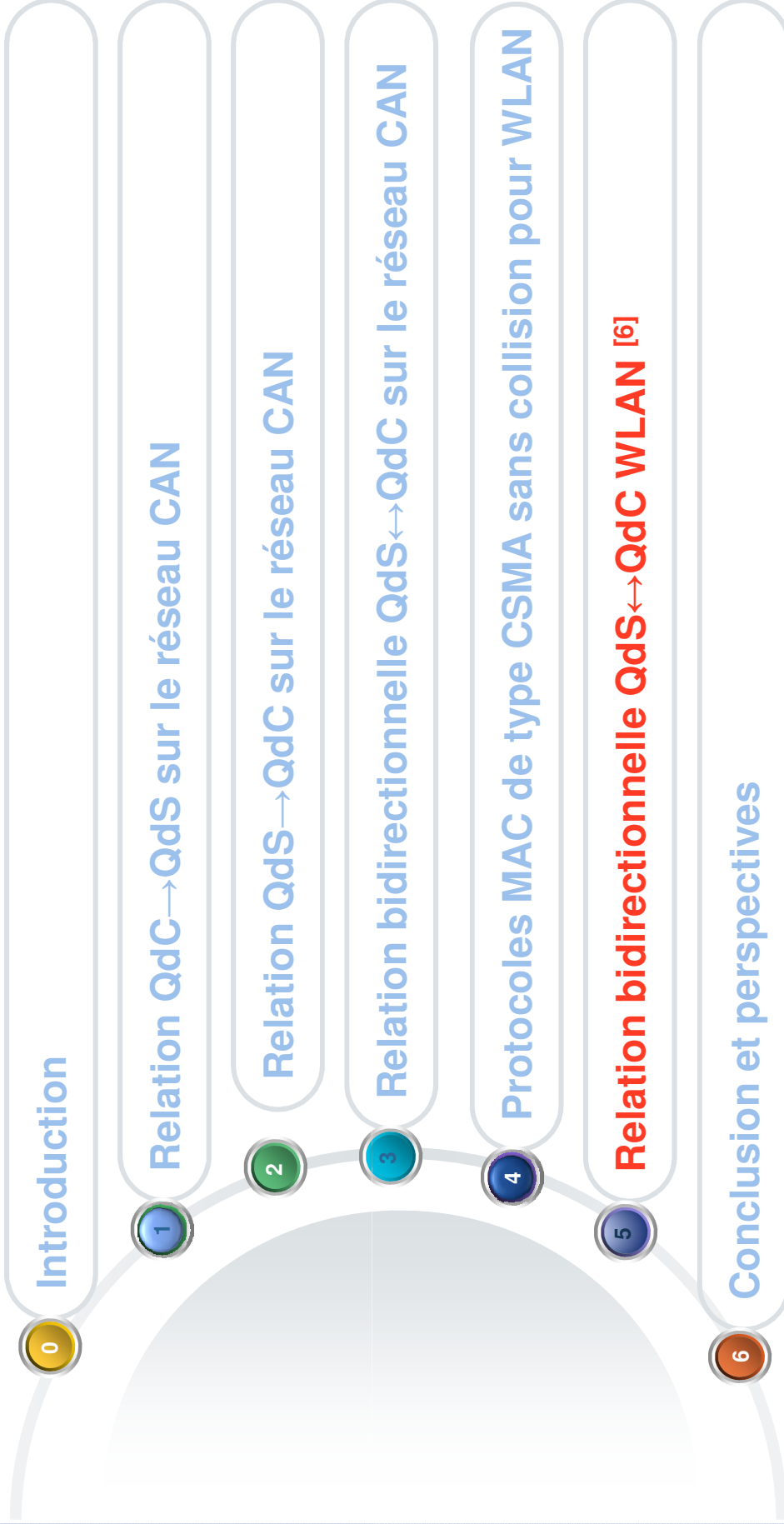
Protocole MAC de type CSMA sans collision pour WLAN

CANlike (5)

- ❖ Médium doit être libre pendant un temps TOBS avant d'émettre le signal de synchronisation et le champ ID de la trame
- Objectif : interdire l'insertion dans une transaction en cours
- ❖ Contrainte : TOBS supérieur à n bits ID $\Rightarrow \text{TOBS} > n(l_b + t_g)$
 On prend $\text{TOBS} = (n+1)(l_b + t_g)$
- ❖ Phase de compétition = $\text{TOBS} + \text{Synchronisation} + \text{Arbitrage}$

$$= 2(n+1)(l_b + t_g)$$
- ❖ Implanté dans TrueTime

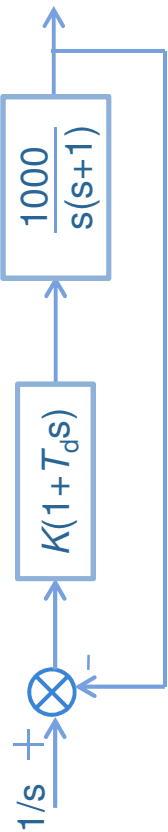
Sommaire



[6]: NGUYEN Xuan et al., ETFA 2012 (en cours de rédaction)

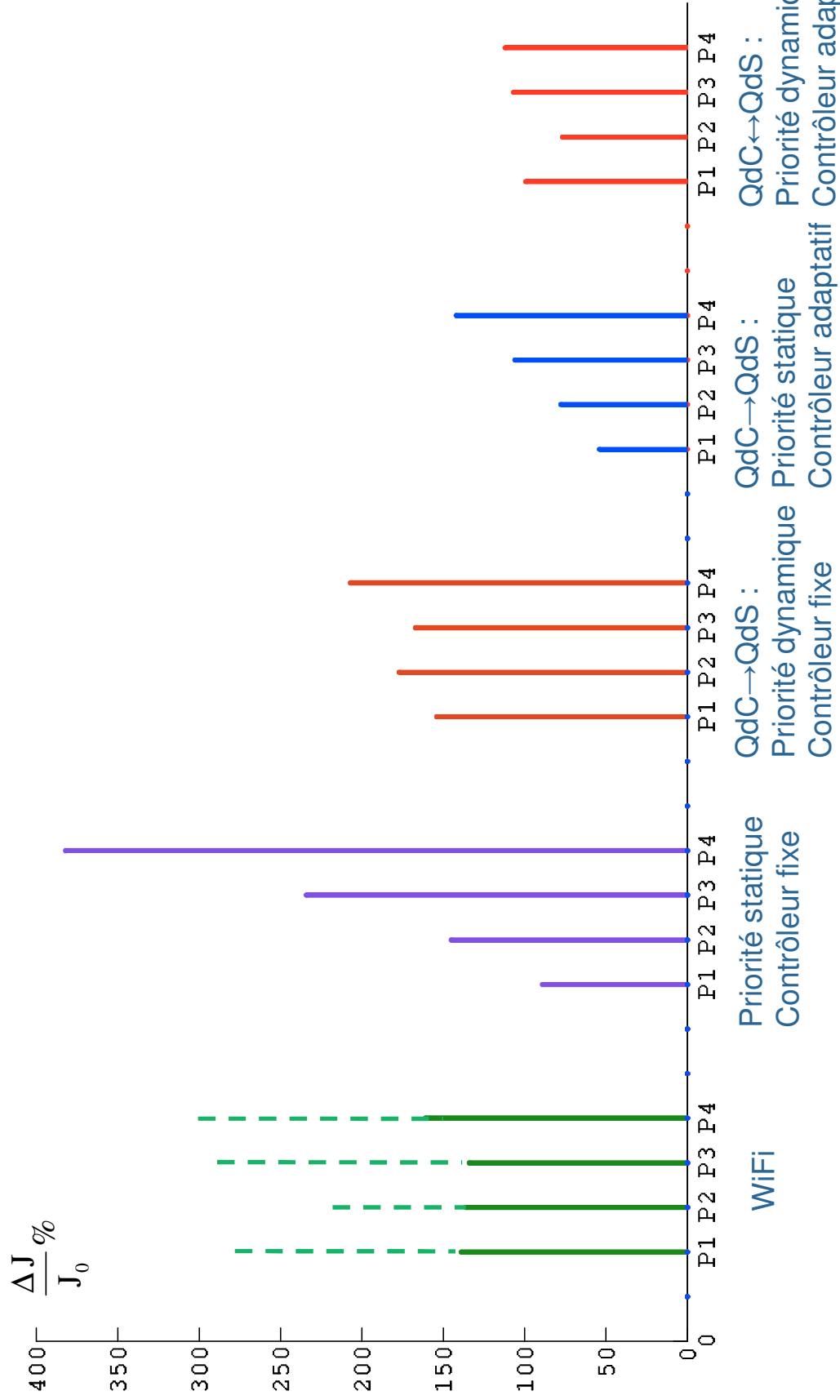
Relation bidirectionnelle QdS ↔ QdC WLAN

Contexte

- ❖ Même Appli C-C que celle considérée précédemment
- 
- ❖ Champ ID = 8 bits
 - ❖ Priorité hybride :
 - 4 bits pour niveau dynamique, 4 bits pour niveau statique
 - schéma ph⁺ = schéma ph + priorité dynamique max pour contrôleur
 - ❖ Implantation de 4 applications identiques (synchrones)
 - niveau statique : $P_{ca1} > P_{ca2} > P_{ca3} > P_{ca4} > P_{cc1} > P_{cc2} > P_{cc3} > P_{cc4}$
 - ❖ WiFi : 1Mbits/s; trame de données 480 bits, DCF = 50μs,
 - ❖ Paramètres CANlike : $I_b = 20 \mu s$; $t_g = 5 \mu s$, même vitesse, durées de trames que WiFi
 - ❖ Critère J

Relation bidirectionnelle QdS $\leftrightarrow$ QdC WLAN

Evaluation de performance : CANlike



Relation bidirectionnelle QdS ↔ QdC WLAN

Conclusion

- ❖ Faisabilité de la relation $QdS \leftrightarrow QdC$ sur un réseau local sans fil avec un protocole MAC CSMA sans collision (CANlike)
- ❖ Meilleure performance que WiFi

Sommaire



[6]: NGUYEN Xuan et al., ETFA 2012 (en cours de rédaction)

Conclusion

Contributions :

- ❖ Définition de priorités hybrides dont la partie dynamique permet de capter l'urgence de transmission des appli C-Cs
 - Relation QdC → QdS
 - Meilleure équité que si priorité statique
- ❖ Mise en oeuvre de la relation $QdS \leftrightarrow QdC$:
 - priorité dynamique
 - pôles dominants
- ❖ Réseau sans fil : spécification des protocoles MAC CSMA sans collision
 - applications temps réel
- ❖ Mise en oeuvre sur réseaux sans fil de la relation $QdS \leftrightarrow QdC$

Perspectives

❖ Aspect réseau

- Faisabilité des protocoles MAC sans collision aux réseaux sans fil multi sauts

❖ Aspect automatique

- Considération de plusieurs types d'appli C-C et types de réseau correcteur
- Autres méthodes de compensation

The background of the slide is a blue grid pattern. In the upper right, there is a 3D illustration of a hand with a blue skin tone pressing a square button on a control panel. The panel has several concentric square frames around the button. The text 'Merci!', 'Thank You!', and 'Xin cảm ơn!' is written in a large, blue, outlined font across the middle of the slide.

Merci!

Thank You!

Xin cảm ơn!

ph+std

- ❖ Profil de référence $P(t)$: une fonction décroissante qui fixe les priorités dynamiques aux instants d'échantillonnage
 - ❖ Stratégie de supervision temporelle en utilisant la fonction $g(u)$
- Algorithme: à l'instant 0, $P = P_{\max}$; à partir de l'instant 1, on fait:

1. Calcul de $g(u)$

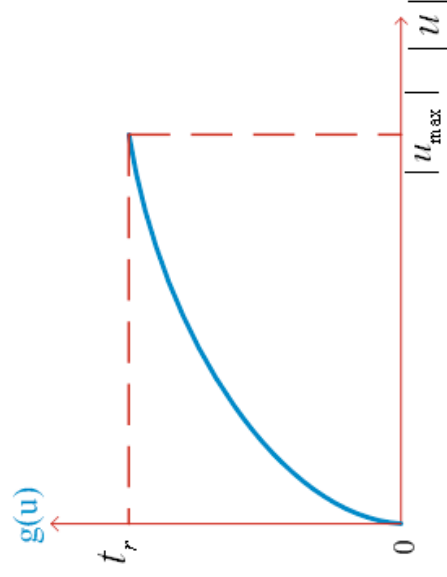
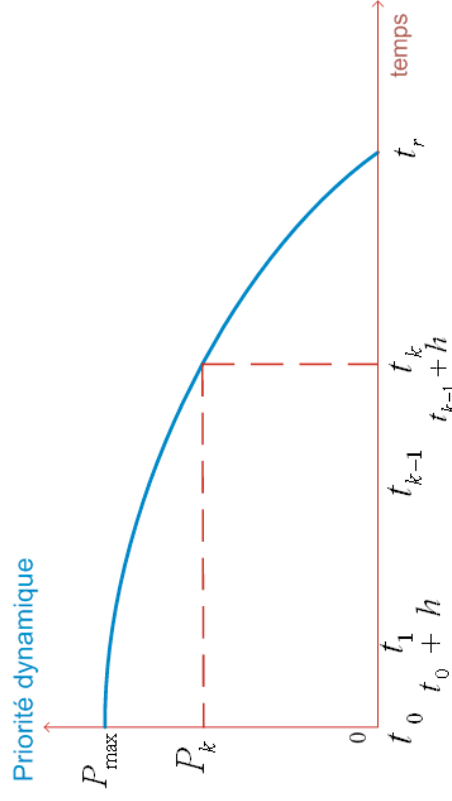
2. Calcul de

$$t_k = t_{k-1} + h - \alpha g(u) \text{ avec } \alpha = t_{k-1}/t_r \text{ (} 0 \leq \alpha \leq 1 \text{)}$$

(a) si $t_k < 0$ alors $t_k = 0$

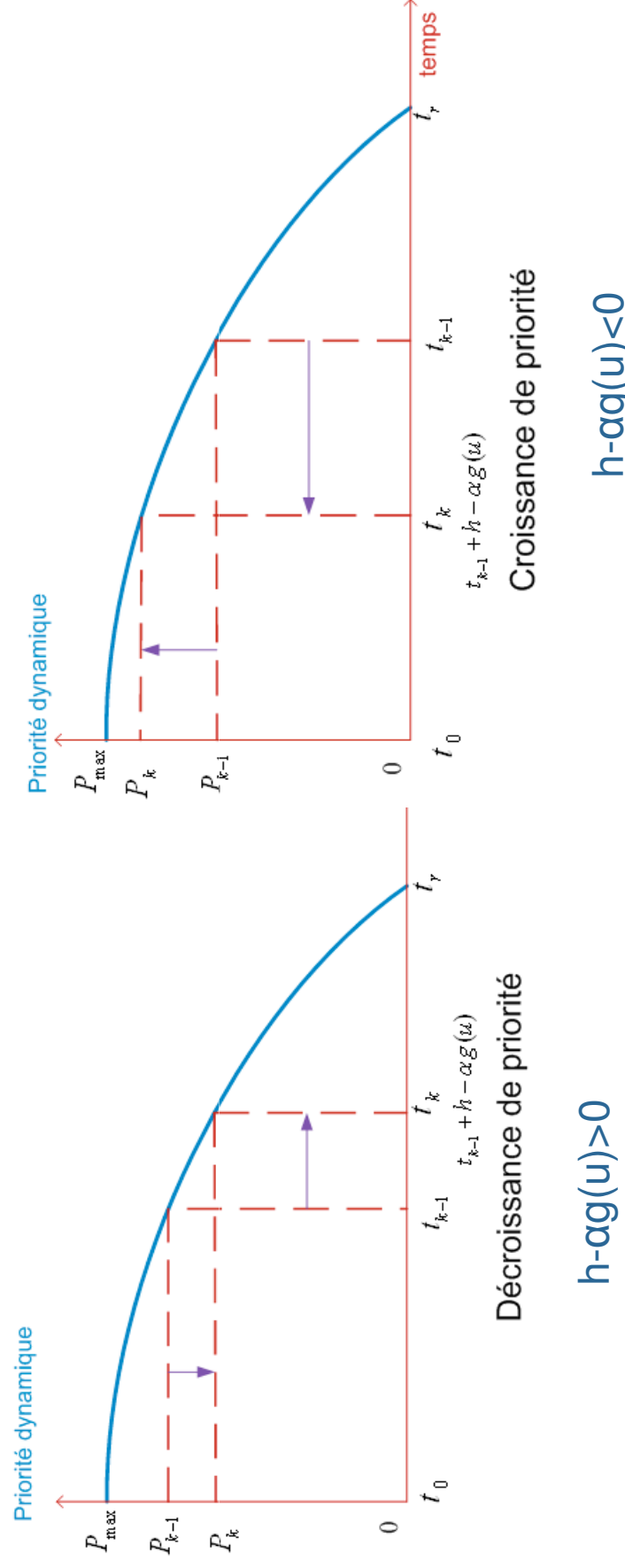
(b) si $t_k > t_r$, $t_k = t_r$

3. Calcul $P = P(t_k)$



ph+std

$$t_k = t_{k-1} + h - \alpha g(u)$$

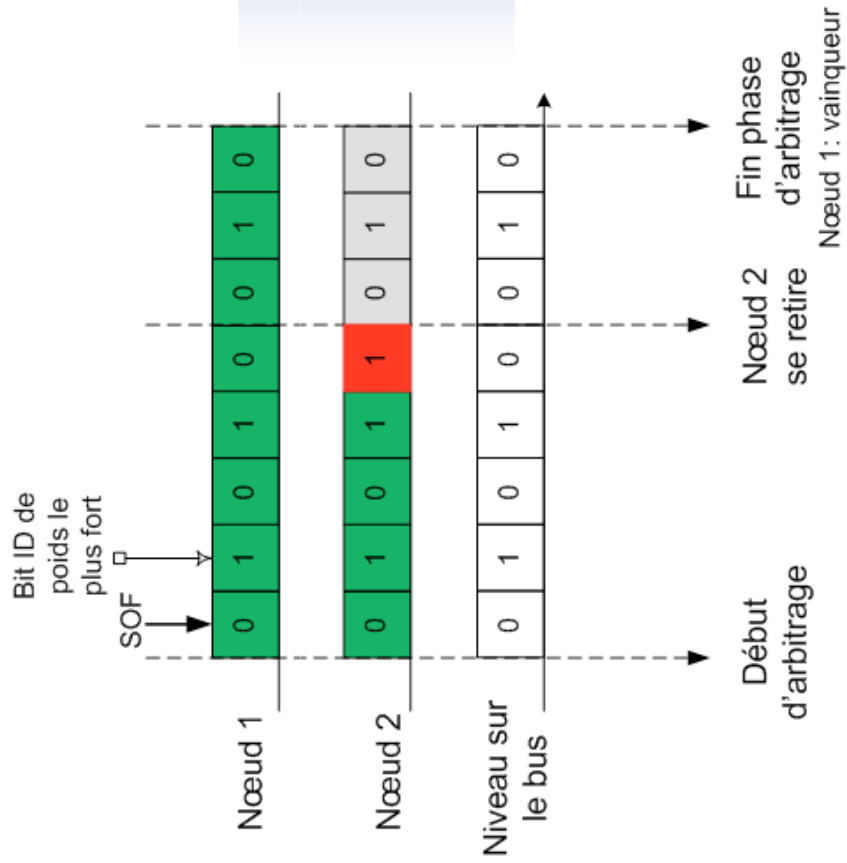


Même priorité: $h - \alpha g(u) = 0$

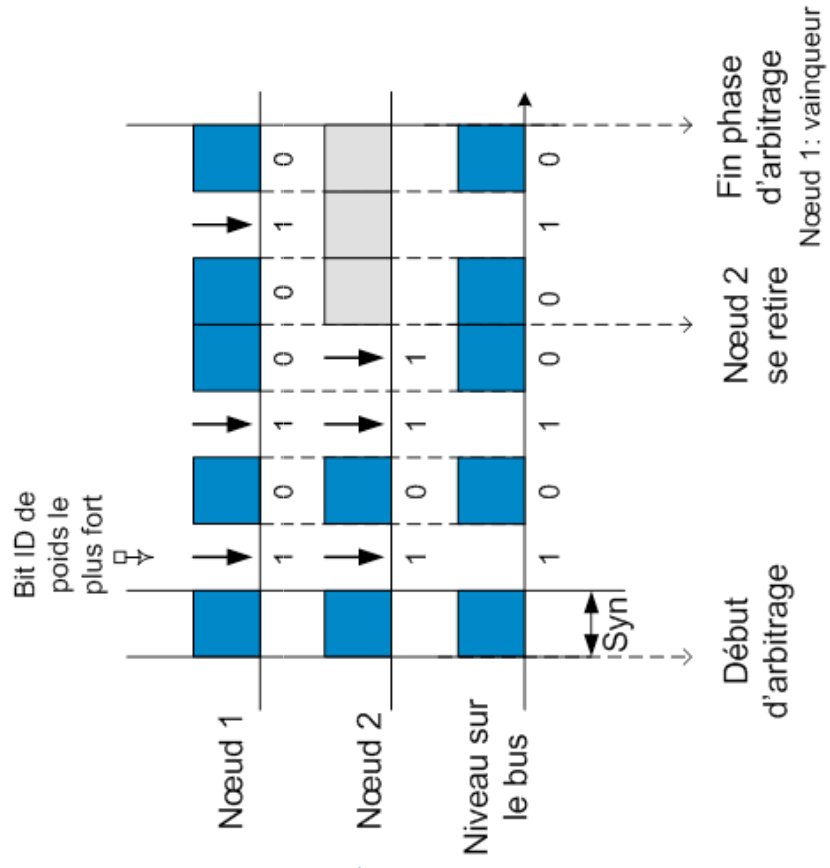


Protocole CANlike : phase d'arbitrage

Bus CAN

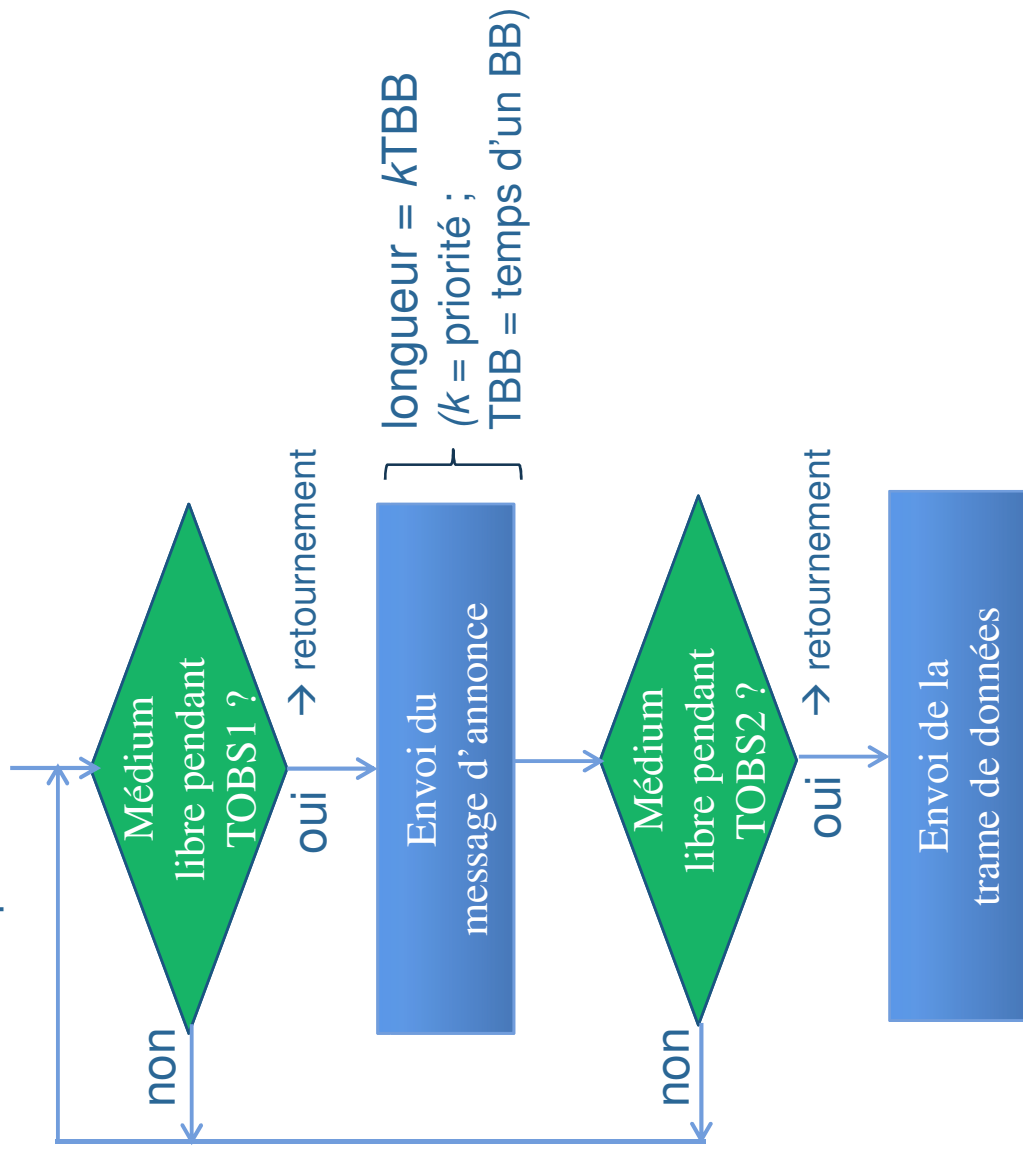


CANlike (réseau sans fil)



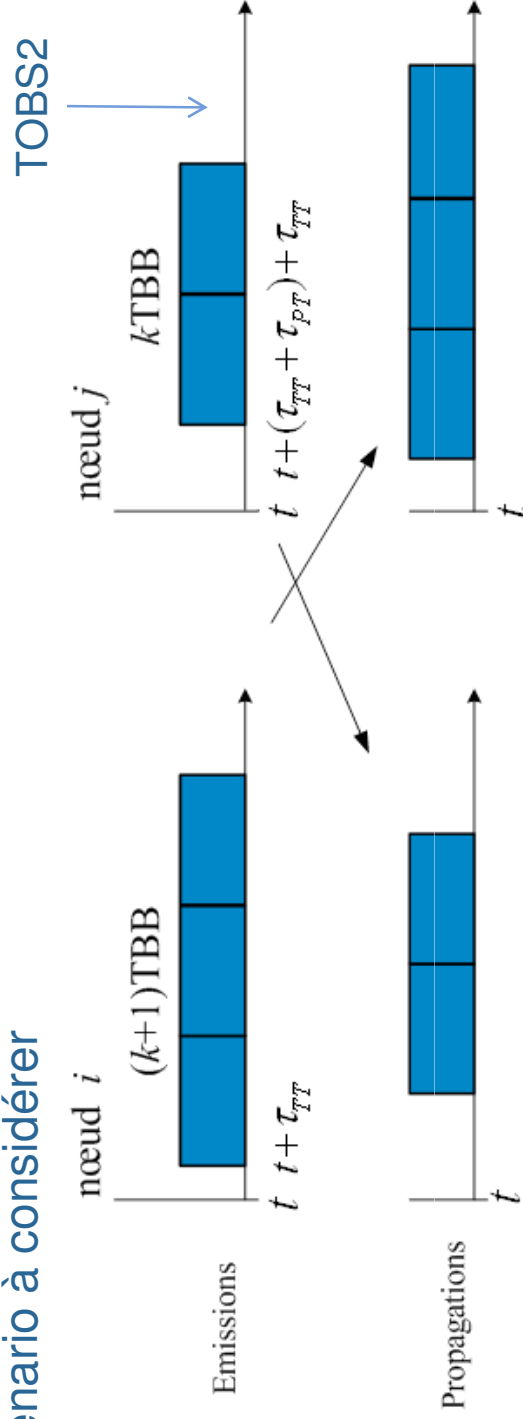
Protocole MAC basé sur BB

- ❖ Sur la base de priorités statiques



Protocole MAC basé sur BB : TBB, TOBS2, TOBS1

❖ Scénario à considérer



❖ Contraintes :

- noeud *i* : noeud *i* doit être vainqueur $\Rightarrow TBB \geq 2\tau_{PT} + \tau_{TT}$
- noeud *j* : noeud *j* doit être vaincu $\Rightarrow TBB \geq 2\tau_{PT} + \tau_{ST}$

❖ TOBS2 : considérer le dépassement (sur j) du signal BB de j par le signal BB venant de i $\Rightarrow TOBS2 = 2\tau_{PT} + \tau_{ST}$

❖ $TOBS1 > TOBS2$ d'au moins un τ_{ST} pour pouvoir détecter correctement l'état du canal $\Rightarrow TOBS1 = 2\tau_{PT} + 2\tau_{PT} + 2\tau_{ST}$

Protocole CANlike : principe

