

---

# Cours ASPD

## Protocoles de Communications

### Telecom Nancy 2A IL

---

Dominique Méry  
Telecom Nancy  
Université de Lorraine

---

**Année universitaire 2025-2026**  
**21 janvier 2026(1:43pm)**

# Sommaire

---

- ① Communications entre processus
- ② Modélisation de protocoles de communication
  - Service d'un protocole
  - Protocole monodirectionnel fiable
  - Protocole fiable avec réordonnancement possible
- ③ Protocole de Stenning
- ④ Protocole ABP
- ⑤ Protocole Sliding Window SWP
- ⑥ Summary

- ① Communications entre processus
  - ② Modélisation de protocoles de communication
    - Service d'un protocole
    - Protocole monodirectionnel fiable
    - Protocole fiable avec réordonnancement possible
  - ③ Protocole de Stenning
  - ④ Protocole ABP
  - ⑤ Protocole Sliding Window SWP
- ⑥ Summary ]

# Problèmes des communications

---

- La communication de données entre deux entités est en général non fiable
- Le support physique de communication peut perdre, dupliquer, réordonner ou détériorer les messages
- Un protocole de communication est une méthode permettant de communiquer des données, en veillant à détecter et à corriger les éventuelles erreurs de transmission
- Modèles d'architectures en couches : des couches basses du réseaux physiques aux couches les plus hautes réalisant les services.
- Modèles d'architecture : OSI et TCP/IP
- Modèles d'empilement des couches avec une relation de raffinement ou de simulation entre une couche supérieure et une couche inférieure : un service de niveau  $n$  est simulé par la couche de niveau  $n-1$

# Modèles de référence OSI

---

- OSI signifie *Open Systems Interconnection*
- Modèle de Référence proposé par l'organisation mondiale de normalisation ISO
- Ce modèle concerne la connexion entre systèmes ouverts à la communication avec d'autres systèmes ouverts
- Le modèle OSI a sept couches :
  - ▶ Une couche correspond à un nouveau d'abstraction pour les communications
  - ▶ Chaque couche possède et effectue des fonctions spécifiques
  - ▶ Les fonctions de chaque couche sont choisies en fonction de la définition de protocoles normalisés internationaux
  - ▶ Le choix des frontières entre les couches doit minimiser le flux d'informations aux interfaces
  - ▶ Le nombre de couches doit être raisonnable et permettre de maîtriser l'architecture et d'éviter la cohabitation dans une même couche de fonctions très différentes.

- **Couche Physique** : elle gère la transmission des bits qui peuvent être altérés par des problèmes de transmission physique.
- **Couche Liaison de données** : elle gère les communications sous forme de trames de données et assure donc la communication entre deux entités, en visant à corriger les problèmes du niveau inférieur (gestion de trames en séquences et des trames d'acquittements) ; elle assure aussi une régulation des émetteurs.
- **Couche réseau** : elle gère le sous-réseau, en particulier elle gère les routes ; elle gère aussi les congestions de ce sous-réseau.
- **Couche transport** : elle assure le découpage des données de la couche session et les passe à la couche réseau. Elle s'assure que les morceaux arrivent correctement au sens des couches supérieures.
- **Couche session** : elle permet d'établir des sessions par les utilisateurs et donc d'utiliser la couche transport : transfert de fichiers par exemple.
- **Couche présentation** : elle concerne la syntaxe et la sémantique de l'information transmise
- **Couche application** : elle compose les protocoles développés

# Modèle TCP/IP

---

- Couche hôte-réseau ou liens de données : connexion de l'hôte à la couche Internet via un protocole permettant d'envoyer des paquets IP ; driver du système d'exploitation et d'une carte d'interface de l'ordinateur aux réseaux.
- Couche Réseau ou Internet : elle permet l'acheminement de paquets dans n'importe quel réseau et dans n'importe quel ordre ; les questions de réacheminement sont réglées par les couches supérieures. Le format est celui du protocole IP.
- Couche transport : elle permet à des paires ou entités connectées deux à deux, de maintenir une conversation ou une communication ; deux protocoles ont été définis :
  - ▶ le protocole TCP qui assure l'acheminement fiable d'un flux d'octets à une autre entité et
  - ▶ le protocole UDP qui est un protocole non-fiable, sans connexion, pour les applications qui ne veulent pas de séquences ou de contrôles de flux.
- Couche Application : elle contient les protocoles de haut niveau comme FTP, TELNET ; SMTP, DNS, SNMP

- ① Communications entre processus
  - ② Modélisation de protocoles de communication
    - Service d'un protocole
    - Protocole monodirectionnel fiable
    - Protocole fiable avec réordonnancement possible
  - ③ Protocole de Stenning
  - ④ Protocole ABP
  - ⑤ Protocole Sliding Window SWP
- ⑥ Summary ]

- ① Communications entre processus
- ② Modélisation de protocoles de communication
  - Service d'un protocole
  - Protocole monodirectionnel fiable
  - Protocole fiable avec réordonnancement possible
- ③ Protocole de Stenning
- ④ Protocole ABP
- ⑤ Protocole Sliding Window SWP
- ⑥ Summary

# Observations

---

- Modélisation par échange de messages :
  - ▶ des actions internes ou locales à un processus
  - ▶ des actions de communications : envoi ou réception
- Canaux de communication :
  - ▶ tout message envoyé est reçu fatalement
  - ▶ tout message envoyé est reçu fatalement mais pas dans l'ordre d'envoi
  - ▶ tout message peut être perdu
- Variables partagées
- communication synchrone ou asynchrone
- modélisation en TLA<sup>+</sup> à partir d'une description des actions en Event-B.

# Choix de modélisation

---

- Donner le « quoi » : spécification de ce que fait le protocole

# Choix de modélisation

---

- Donner le « quoi » : spécification de ce que fait le protocole
  - ▶ envoi d'un message m par un processus P à un processus Q

# Choix de modélisation

---

- Donner le « quoi » : spécification de ce que fait le protocole
  - ▶ envoi d'un message m par un processus P à un processus Q
  - ▶ décomposition en plusieurs phases

# Choix de modélisation

---

- Donner le « quoi » : spécification de ce que fait le protocole
  - ▶ envoi d'un message m par un processus P à un processus Q
  - ▶ décomposition en plusieurs phases
- Donner le « comment » : simulation du protocole par des événements et des phases des couches plus basses
- Modélisation par raffinement à partir du service attendu pour mettre en œuvre dans les couches plus basses ou concrètes

# Observation d'un système réparti

- $u_0 \xrightarrow{e_0} u_1 \xrightarrow{e_1} \dots \xrightarrow{e_{i-1}} u_i \xrightarrow{e_i} u_{i+1} \xrightarrow{e_{i+1}} \dots$
- $e_0$  ou  $e_1$  ou ... ou  $e_{i-1}$  ou  $e_i$  ou  $e_{i+1}$  ou ...
- $e \in \{e_0, e_1, \dots, e_{i-1}, e_i, e_{i+1}, \dots\}$
- $e \in E : E$  est l'ensemble fini des actions ou des événements observés sur le système modifiant l'état courant.
- $u_0 \xrightarrow{g} \dots \xrightarrow{f} u \xrightarrow{e} u' \xrightarrow{g} \dots$
- Chaque événement modélise la transformation d'une liste de variables d'états appelées *frame* et notée  $u$  :

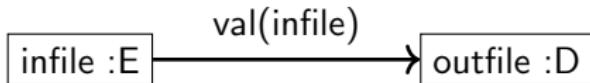
**if**  $cond(u)$  **then**  $u := f(u)$  **fi**

## Non-déterminisme et entrelacement

Les événements de  $E$  sont observés les uns à la suite des autres en veillant à ce qu'un événement est observé quand sa *garde* est vraie. On peut ajouter une hypothèse d'équité sur la trace produite.

# Modélisation du protocole de communication

- La valeur d'un fichier *infile* est transmise d'un émetteur *E* à un destinataire *D*



- Un service associé à un protocole de communication revient à effectuer une affectation du type :

`outfile := infile`

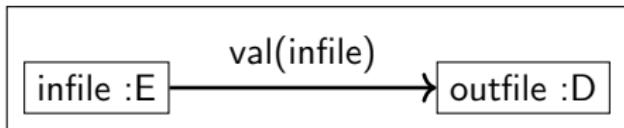
- Le nombre d'items ou d'enregistrements du fichier est *n* et ces données sont des éléments de DATA

- ▶ DATA est un ensemble de données
- ▶ *infile* est un fichier de longueur *n* :

- $n \in \mathbb{N}_1$
- $infile \in 1 .. n \rightarrow \text{DATA}$

## Modélisation du protocole

- Spécification du service attendu par les deux partenaires  $E$  et  $D$  : transmission du fichier *infile* de  $E$  via un canal de communication et réception dans un fichier *outfile* de  $D$ .



- $outfile$  est une variable localisée en  $D$
  - $inv1 : outfile \in 1..n \rightarrow DATA$  : pendant la transmission,  $outfile$  contient une partie des données et n'a pas tout reçu.

# Service du protocole

---

- communication  $\stackrel{def}{=} \text{begin } outfile := infile \text{ end}$
- Initialement, le fichier *outfile* contient n'importe quoi.
- L'événement communication réalise le service attendu en un coup !

## Observation des communications

Le protocole de communication est construit selon des hypothèses de l'environnement :

- communication  $\stackrel{def}{=} \text{begin } outfile := infile \text{ end}$
- Initialement, le fichier *outfile* contient n'importe quoi.
- L'événement communication réalise le service attendu en un coup !

## Observation des communications

Le protocole de communication est construit selon des hypothèses de l'environnement : hostilité,

- communication  $\stackrel{def}{=} \text{begin } outfile := infile \text{ end}$
- Initialement, le fichier *outfile* contient n'importe quoi.
- L'événement communication réalise le service attendu en un coup !

## Observation des communications

Le protocole de communication est construit selon des hypothèses de l'environnement : hostilité, fautes,

- communication  $\stackrel{def}{=} \text{begin } outfile := infile \text{ end}$
- Initialement, le fichier *outfile* contient n'importe quoi.
- L'événement communication réalise le service attendu en un coup !

## Observation des communications

Le protocole de communication est construit selon des hypothèses de l'environnement : hostilité, fautes, pertes,

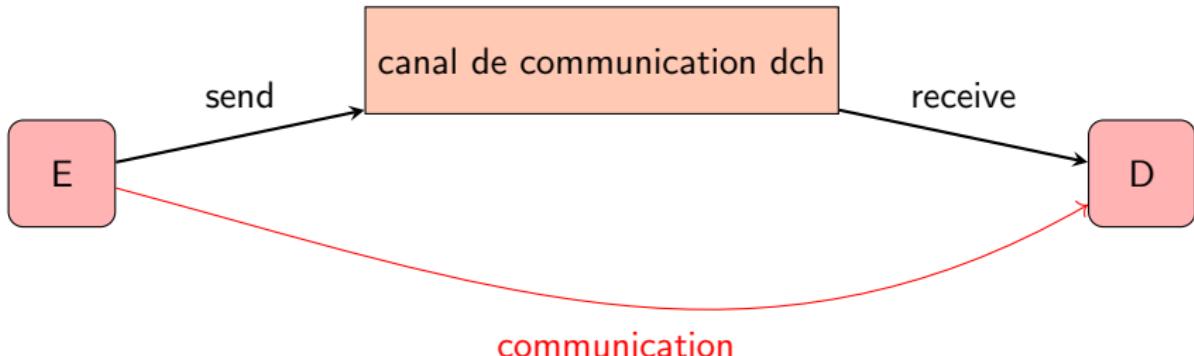
- communication  $\stackrel{def}{=} \text{begin } outfile := infile \text{ end}$
- Initialement, le fichier *outfile* contient n'importe quoi.
- L'événement communication réalise le service attendu en un coup !

## Observation des communications

Le protocole de communication est construit selon des hypothèses de l'environnement : hostilité, fautes, pertes, mensonges ...

- ① Communications entre processus
- ② Modélisation de protocoles de communication
  - Service d'un protocole
  - Protocole monodirectionnel fiable**
  - Protocole fiable avec réordonnancement possible
- ③ Protocole de Stenning
- ④ Protocole ABP
- ⑤ Protocole Sliding Window SWP
- ⑥ Summary

- Un émetteur envoie des trames à un récepteur
- La communication a lieu dans un seul sens
- Le canal de communication est parfait
- Le récepteur reçoit toutes les données transmises
- L'émetteur envoie les données le plus rapidement possible
- Une trame contient les informations suivantes : type (indicateur de données ou non), séquence (numéro de trame), ack (ack éventuel), info (information transportée ou octet)
- Evénements :
  - ▶ SENDING(trame,dest) via la couche physique
  - ▶ RECEIVING(trame) via la couche physique



- *E* envoie à *D* par le canal de communication modélisé par la variable *dch*
- *sendingdata* dépose la valeur *infile(s)* dans le canal de communication
- *receivingdata* récupère la valeur suivante se trouvant dans le canal *dch*.
- On conserve l'ordre d'envoi de type fifo

- $outfile$  est localisée sur  $D$  et reçoit les valeurs de  $E$  via le canal.
- $r$  et  $s$  sont deux indicis de contrôle pour gérer en type fifo
- $dch$  modélise le canal de communication.

$inv1 : outfile \in 1..n \rightarrow DATA$

$inv2 : r \in 0..n$

$inv3 : s \in 1..n+1$

$inv4 : r \leq s$

$inv5 : dch \in 1..n \rightarrow DATA$

$inv6 : outfile = 1..r \triangleleft infile$

$inv7 : dch \subseteq 1..s-1 \triangleleft infile$

$inv8 : outfile \subseteq dch$

- (inv6) :  $outfile$  contient la copie du fichier  $infile$  entre 1 et  $r$ .
- (inv4) : le curseur de réception  $r$  est plus petit que le curseur d'envoi  $s$ .
- (inv8) : les données reçues sont des copies de données transmises dans  $dch$
- (inv7) : le canal  $dch$  ne transmet que des valeurs du fichier  $infile$  dans l'ordre fifo avec comme borne courante  $s$

- INITIALISATION  $\stackrel{def}{=}$  
$$\begin{pmatrix} outfile := \emptyset \\ r := 0 \\ s := 1 \\ dch := \emptyset \end{pmatrix}$$
- transmissionover  $\stackrel{def}{=}$  if  $r = n$  then skip end
- sendingdata  $\stackrel{def}{=}$  if  $s \leq n$  then 
$$\begin{bmatrix} dch(s) := infile(s) \\ s := s+1 \end{bmatrix}$$
 end
- receivingdata  $\stackrel{def}{=}$
- if  $r+1 \in dom(dch)$  then 
$$\begin{bmatrix} outfile(r+1) := dch(r+1) \\ r := r+1 \end{bmatrix}$$

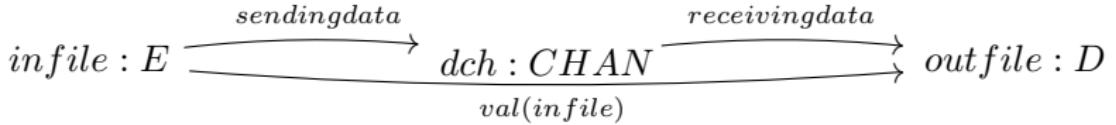
# Protocole FIFO-FIABLE

---

- $E :: \text{if } s \leq n \text{ then } dch(s), s := \text{infile}(s), s+1 \text{ fi}$
  - $D :: \text{if } r+1 \in \text{dom}(dch) \text{ then } \text{outfile}(r+1), r := dch(r+1), r+1 \text{ fi}$
- k
- $E :: \text{if } s \leq n \text{ then } \begin{cases} \text{send infile}(s) \text{ to } D \text{ in } dch \\ s := s+1 \end{cases} \text{ fi}$
  - $D :: \text{if } r+1 \in \text{dom}(dch) \text{ then } \begin{cases} \text{receive } dch(r+1) \text{ in } ioutfile(r+1) \\ r := r+1 \end{cases} \text{ fi p}$

## Sommaire du protocole

- $E :: \text{if } s \leq n \text{ then } \begin{cases} \text{send } \textit{infile}(s) \text{ to } D \text{ in } \textit{dch} \\ s := s+1 \end{cases} \text{ fi}$
  - $D :: \text{if } r+1 \in \text{dom}(\textit{dch}) \text{ then } \begin{cases} \text{receive } \textit{dch}(r+1) \text{ in } \textit{outfile}(r+1) \\ r := r+1 \end{cases} \text{ fi}$



- ① Communications entre processus
- ② Modélisation de protocoles de communication
  - Service d'un protocole
  - Protocole monodirectionnel fiable
  - Protocole fiable avec réordonnancement possible
- ③ Protocole de Stenning
- ④ Protocole ABP
- ⑤ Protocole Sliding Window SWP
- ⑥ Summary

# fiable avec réordonnancement possible

- variables  $outfile, s, dch$
- invariants

$inv1 : s \in 1 .. n+1$

$inv2 : dch \in 1 .. n \rightarrow DATA$

$inv4 : \text{dom}(dch) \cap \text{dom}(outfile) = \emptyset$

$inv3 : dch \cup outfile = 1 .. (s-1) \triangleleft infile$

- INITIALISATION  $\stackrel{\text{def}}{=}$  
$$\left( \begin{array}{l} outfile := \emptyset \\ s := 1 \\ dch := \emptyset \end{array} \right)$$
- communication2  $\stackrel{\text{def}}{=}$  if 
$$\left[ \begin{array}{l} s = n+1 \\ dch = \emptyset \end{array} \right]$$
 then skip end
- sendingdata  $\stackrel{\text{def}}{=}$  if 
$$[ s \leq n ]$$
 then 
$$\left[ \begin{array}{l} dch(s) := infile(s) \\ s := s+1 \end{array} \right]$$
 end
- receivingdata  $\stackrel{\text{def}}{=}$   
if 
$$\left[ \begin{array}{l} r \in \text{dom}(dch) \\ m \in DATA \\ dch(r) = m \\ r \notin \text{dom}(outfile) \end{array} \right]$$
 then 
$$\left[ \begin{array}{l} outfile := outfile \cup \{r \mapsto m\} \\ dch := dch \setminus \{r \mapsto m\} \end{array} \right]$$
 end

- Hypothèse de fiabilité excessive
- Le canal de communication peut ne pas protéger les données transmises



Prise en compte des pertes de messages.

- ① Communications entre processus
  - ② Modélisation de protocoles de communication
    - Service d'un protocole
    - Protocole monodirectionnel fiable
    - Protocole fiable avec réordonnancement possible
  - ③ Protocole de Stenning
  - ④ Protocole ABP
  - ⑤ Protocole Sliding Window SWP
- ⑥ Summary ]

# Protocole fiable avec attente

---

- Le protocole envoie des trames mais attend que le récepteur lui signale la réception
- Le canal de communication est toujours supposé fiable mais le flux est contrôlé
- Evénements :
  - ▶ SENDING(trame,dest) via la couche physique
  - ▶ WAITING(trameack) via la couche physique
  - ▶ RECEIVING(trame) via la couche physique
  - ▶ SENDING(trameack,eme) via la couche physique

# Protocole fiable avec attente

---

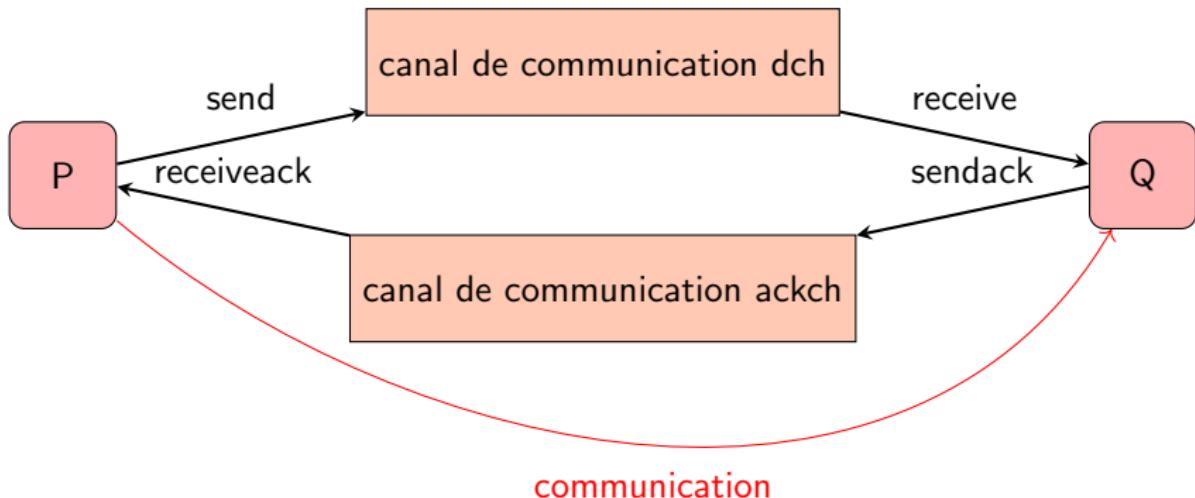
- Le protocole envoie des trames mais attend que le récepteur lui signale la réception
- Le canal de communication est toujours supposé fiable mais le flux est contrôlé
- Evénements :
  - ▶ SENDING(trame,dest) via la couche physique
  - ▶ WAITING(trameack) via la couche physique
  - ▶ RECEIVING(trame) via la couche physique
  - ▶ SENDING(trameack,eme) via la couche physique
- Hypothèse de fiabilité irréaliste

# Protocole avec acquittement et retransmission

---

- Le protocole précédent est non fiable dans la mesure où la couche physique est peut-être non fiable ou bruitée
- L'idée est de contrôler si la trame envoyée est bien reçue sinon on renvoie mais le récepteur doit être capable de savoir qu'il s'agit d'une trame dupliquée.
- Evénements :
  - ▶ SENDING(trame,dest) via la couche physique avec un numéro de trame
  - ▶ WAITING(trameack) via la couche physique du numéro de trame et ré-émission de la trame si nécessaire
  - ▶ RECEIVING\_ACK via le canal physique de la trame ack avec le numéro
  - ▶ RECEIVING(trame) via la couche physique
  - ▶ SENDING(trameack,eme) via la couche physique avec le numéro de trame reçue

# Protocole de Stenning



- Soient deux entités P et Q : P veut envoyer des messages à Q
- P envoie une suite de données  $d_1, \dots, d_n$  à Q
- P répète les deux opérations :
  - ▶ phase d'envoi : P envoie la donnée  $(d_i, i)$  à Q
  - ▶ phase d'attente : P attend de recevoir la valeur  $i$
  - ▶ phase de confirmation : si  $i$  est reçue, alors le protocole reprend à la phase d'envoi

# Protocole de Stenning

- VARIABLES  $dch, s, r, ackch, outfile$

- - $inv1 : r \in 0 .. n$
  - $inv2 : s \in 1 .. n+1$
  - $inv3 : dch \in 1 .. n \rightarrow DATA$
  - $inv4 : ackch \subseteq 1 .. n$
  - $inv5 : r \leq s$
  - $inv6 : s \leq r+1$
  - $inv7 : outfile = 1 .. r \triangleleft infile$
  - $inv8 : dch \subseteq 1 .. s \triangleleft infile$
  - $inv9 : s \leq n+1$
  - $inv10 : r \leq n$
  - $inv11 : outfile \in 1 .. n \rightarrow DATA$
  - $inv12 : s \notin \text{dom}(outfile) \Rightarrow s = r+1$
  - $inv13 : s \in \text{dom}(outfile) \Rightarrow s = r$
  - $inv14 : s \in ackch \Rightarrow s \in \text{dom}(outfile)$
  - $inv15 : ackch \subseteq 1 .. r$

## THEOREMS

$th : r = n \Rightarrow outfile = infile \text{ safety property}$

# Protocole de Stenning

---

- INITIALISATION  $\stackrel{def}{=}$  
$$\begin{bmatrix} dch := \emptyset \\ ackch := \emptyset \\ s := 1 \\ r := 0 \\ outfile := \emptyset \end{bmatrix}$$
- servicedone  $\stackrel{def}{=}$  if [  $r = n$  ] then [ skip ] end
- sendingadata  $\stackrel{def}{=}$  if [  $s \leq n$  ] then [  $dch(s) := infile(s)$  ] end
- receivingadata  $\stackrel{def}{=}$   
if [  $r+1 \in dom(dch)$  ] then 
$$\begin{bmatrix} outfile(r+1) := dch(r+1) \\ r := r+1 \end{bmatrix}$$
 end
- sendingack  $\stackrel{def}{=}$  if [  $r \neq 0$  ] then [  $ackch := ackch \cup \{r\}$  ] end
- receivingack  $\stackrel{def}{=}$  if [  $s \in ackch$  ] then [  $s := s+1$  ] end

# Protocole de Stenning

---

- $\text{daemondch} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{array}{l} \text{if } \left[ \begin{array}{l} i \in 1..n \\ m \in DATA \\ i \mapsto m \in dch \end{array} \right] \text{ then } [ dch := dch \setminus \{i \mapsto m\} ] \text{ end} \end{array}$
- $\text{daemonack} \stackrel{\text{def}}{=} \text{if } [ i \in ackch \text{ then } [] \text{ end} ]$
- Les deux événements introduisent des erreurs du type perte de messages
- Le modèle permet donc de décrire à la fois le protocole et l'environnement.

- ① Communications entre processus
  - ② Modélisation de protocoles de communication
    - Service d'un protocole
    - Protocole monodirectionnel fiable
    - Protocole fiable avec réordonnancement possible
  - ③ Protocole de Stenning
  - ④ Protocole ABP
  - ⑤ Protocole Sliding Window SWP
- ⑥ Summary ]

# Protocole ABP (Alternating Bit Protocol)

---

- Le protocole ABP (Alternating Bit Protocol) est un protocole de communication qui vise à fournir un canal de communication fiable sur un canal peu fiable.
- ABP est une version simplifiée du protocole TCP (Transmission Control Protocol) utilisé sur Internet.
- ABP est une évolution du protocole de Stenning.

# Protocole bidirectionnel à fenêtre de taille 1

---

- Ce protocole est aussi appelé le protocole du *bit alterné*
- Pour régler les problèmes de codage des numéros de trame, on observe que l'on a besoin uniquement d'un bit pour contrôler si la trame est effectivement répétée et reçue in fine.

# Section Courante

---

- ① Communications entre processus
  - ② Modélisation de protocoles de communication
    - Service d'un protocole
    - Protocole monodirectionnel fiable
    - Protocole fiable avec réordonnancement possible
  - ③ Protocole de Stenning
  - ④ Protocole ABP
  - ⑤ Protocole Sliding Window SWP
- ⑥ Summary ]

# Protocole bidirectionnel à fenêtre de taille n

---

- Ce protocole est aussi appelé le protocole du *sliding window protocol*
- Le protocole précédent peut être amélioré par une fenêtre de longueur  $n \geq 1$  et cette fenêtre glisse en suivant les trames recues.

# DONNÉES

---

**CONTEXT DATA**

**SETS**

$D$

**CONSTANTS**

$n, IN, l$

**AXIOMS**

$axm1 : n \in \mathbb{N}_1$

$axm2 : IN \in \mathbb{N} \rightarrow D$

$axm3 : dom(IN) = 0 .. n$

$axm4 : l \in \mathbb{N}_1$

$axm5 : l \leq n$

**END**

# PROCESSUS Sliding-Window Protocol

**VARIABLES** : OUT, i , chan, ack, got

$inv1 : OUT \in \mathbb{N} \rightarrow D$

$inv2 : i \in 0..n+1$

$inv3 : 0..i-1 \subseteq \text{dom}(OUT)$

$inv3bis : \text{dom}(OUT) \subseteq 0..n$

$inv7 : chan \in \mathbb{N} \rightarrow D$

$inv8 : ack \subseteq \mathbb{N}$

$inv9 : ack \cup got \subseteq i..i+l \cap 0..n$

$inv10 : got \subseteq \mathbb{N}$

$inv12 : \text{dom}(chan) \subseteq 0..i+l \cap 0..n$

$inv13 : got \subseteq \text{dom}(OUT)$

$inv14 : ack \subseteq \text{dom}(OUT)$

$inv16 : 0..i-1 \triangleleft OUT = 0..i-1 \triangleleft IN$

$inv17 : chan \subseteq IN$

$inv18 : OUT \subseteq IN \wedge got \subseteq \text{dom}(chan)$

# PROCESSUS Sliding-Window Protocol

**VARIABLES** : OUT, i , chan, ack, got

$inv1 : OUT \in \mathbb{N} \rightarrow D$

$inv2 : i \in 0..n+1$

$inv3 : 0..i-1 \subseteq \text{dom}(OUT)$

$inv3bis : \text{dom}(OUT) \subseteq 0..n$

$inv7 : chan \in \mathbb{N} \rightarrow D$

$inv8 : ack \subseteq \mathbb{N}$

$inv9 : ack \cup got \subseteq i..i+l \cap 0..n$

$inv10 : got \subseteq \mathbb{N}$

$inv12 : \text{dom}(chan) \subseteq 0..i+l \cap 0..n$

$inv13 : got \subseteq \text{dom}(OUT)$

$inv14 : ack \subseteq \text{dom}(OUT)$

$inv16 : 0..i-1 \triangleleft OUT = 0..i-1 \triangleleft IN$

$inv17 : chan \subseteq IN$

$inv18 : OUT \subseteq IN \wedge got \subseteq \text{dom}(chan)$

- Idée du protocole : faire glisser une fenêtre

# PROCESSUS Sliding-Window Protocol

**VARIABLES** : OUT, i , chan, ack, got

$inv1 : OUT \in \mathbb{N} \rightarrow D$

$inv2 : i \in 0..n+1$

$inv3 : 0..i-1 \subseteq \text{dom}(OUT)$

$inv3bis : \text{dom}(OUT) \subseteq 0..n$

$inv7 : chan \in \mathbb{N} \rightarrow D$

$inv8 : ack \subseteq \mathbb{N}$

$inv9 : ack \cup got \subseteq i..i+l \cap 0..n$

$inv10 : got \subseteq \mathbb{N}$

$inv12 : \text{dom}(chan) \subseteq 0..i+l \cap 0..n$

$inv13 : got \subseteq \text{dom}(OUT)$

$inv14 : ack \subseteq \text{dom}(OUT)$

$inv16 : 0..i-1 \triangleleft OUT = 0..i-1 \triangleleft IN$

$inv17 : chan \subseteq IN$

$inv18 : OUT \subseteq IN \wedge got \subseteq \text{dom}(chan)$

- Idée du protocole : faire glisser une fenêtre
- Réception progressive des données au cours du glissement

# PROCESSUS Sliding-Window Protocol

**VARIABLES** : OUT, i , chan, ack, got

$inv1 : OUT \in \mathbb{N} \rightarrow D$

$inv2 : i \in 0..n+1$

$inv3 : 0..i-1 \subseteq \text{dom}(OUT)$

$inv3bis : \text{dom}(OUT) \subseteq 0..n$

$inv7 : chan \in \mathbb{N} \rightarrow D$

$inv8 : ack \subseteq \mathbb{N}$

$inv9 : ack \cup got \subseteq i..i+l \cap 0..n$

$inv10 : got \subseteq \mathbb{N}$

$inv12 : \text{dom}(chan) \subseteq 0..i+l \cap 0..n$

$inv13 : got \subseteq \text{dom}(OUT)$

$inv14 : ack \subseteq \text{dom}(OUT)$

$inv16 : 0..i-1 \triangleleft OUT = 0..i-1 \triangleleft IN$

$inv17 : chan \subseteq IN$

$inv18 : OUT \subseteq IN \wedge got \subseteq \text{dom}(chan)$

- Idée du protocole : faire glisser une fenêtre
- Réception progressive des données au cours du glissement
- Deux canaux d'échanges :

# PROCESSUS Sliding-Window Protocol

**VARIABLES** : OUT, i , chan, ack, got

$inv1 : OUT \in \mathbb{N} \rightarrow D$

$inv2 : i \in 0..n+1$

$inv3 : 0..i-1 \subseteq \text{dom}(OUT)$

$inv3bis : \text{dom}(OUT) \subseteq 0..n$

$inv7 : chan \in \mathbb{N} \rightarrow D$

$inv8 : ack \subseteq \mathbb{N}$

$inv9 : ack \cup got \subseteq i..i+l \cap 0..n$

$inv10 : got \subseteq \mathbb{N}$

$inv12 : \text{dom}(chan) \subseteq 0..i+l \cap 0..n$

$inv13 : got \subseteq \text{dom}(OUT)$

$inv14 : ack \subseteq \text{dom}(OUT)$

$inv16 : 0..i-1 \triangleleft OUT = 0..i-1 \triangleleft IN$

$inv17 : chan \subseteq IN$

$inv18 : OUT \subseteq IN \wedge got \subseteq \text{dom}(chan)$

- Idée du protocole : faire glisser une fenêtre
- Réception progressive des données au cours du glissement
- Deux canaux d'échanges :
  - ▶ *chan* est le canal de communication des données à partir de *IN* vers *OUT*

# PROCESSUS Sliding-Window Protocol

**VARIABLES** : OUT, i , chan, ack, got

*inv1 : OUT*  $\in \mathbb{N} \rightarrow D$

*inv2 : i*  $\in 0..n+1$

*inv3 : 0..i-1*  $\subseteq \text{dom(OUT)}$

*inv3bis : dom(OUT)*  $\subseteq 0..n$

*inv7 : chan*  $\in \mathbb{N} \rightarrow D$

*inv8 : ack*  $\subseteq \mathbb{N}$

*inv9 : ack*  $\cup$  *got*  $\subseteq i..i+l \cap 0..n$

*inv10 : got*  $\subseteq \mathbb{N}$

*inv12 : dom(chan)*  $\subseteq 0..i+l \cap 0..n$

*inv13 : got*  $\subseteq \text{dom(OUT)}$

*inv14 : ack*  $\subseteq \text{dom(OUT)}$

*inv16 : 0..i-1*  $\triangleleft$  *OUT* = *0..i-1*  $\triangleleft$  *IN*

*inv17 : chan*  $\subseteq IN$

*inv18 : OUT*  $\subseteq IN \wedge$  *got*  $\subseteq \text{dom(chan)}$

- Idée du protocole : faire glisser une fenêtre
- Réception progressive des données au cours du glissement
- Deux canaux d'échanges :
  - ▶ *chan* est le canal de communication des données à partir de *IN* vers *OUT*
  - ▶ *ack* est le canal de retour.

# PROCESSUS Sliding-Window Protocol

**VARIABLES** : OUT, i , chan, ack, got

*inv1 : OUT*  $\in \mathbb{N} \rightarrow D$

*inv2 : i*  $\in 0..n+1$

*inv3 : 0..i-1*  $\subseteq \text{dom(OUT)}$

*inv3bis : dom(OUT)*  $\subseteq 0..n$

*inv7 : chan*  $\in \mathbb{N} \rightarrow D$

*inv8 : ack*  $\subseteq \mathbb{N}$

*inv9 : ack*  $\cup$  *got*  $\subseteq i..i+l \cap 0..n$

*inv10 : got*  $\subseteq \mathbb{N}$

*inv12 : dom(chan)*  $\subseteq 0..i+l \cap 0..n$

*inv13 : got*  $\subseteq \text{dom(OUT)}$

*inv14 : ack*  $\subseteq \text{dom(OUT)}$

*inv16 : 0..i-1*  $\triangleleft$  *OUT* = *0..i-1*  $\triangleleft$  *IN*

*inv17 : chan*  $\subseteq IN$

*inv18 : OUT*  $\subseteq IN \wedge$  *got*  $\subseteq \text{dom(chan)}$

- Idée du protocole : faire glisser une fenêtre
- Réception progressive des données au cours du glissement
- Deux canaux d'échanges :

- ▶ *chan* est le canal de communication des données à partir de *IN* vers *OUT*
- ▶ *ack* est le canal de retour.

# Phases du protocole

---

- Initialisation du protocole

$$\text{INITIALISATION} \stackrel{\text{def}}{=} \left[ \begin{array}{l} OUT := \emptyset \\ i := 0 \\ chan := \emptyset \\ ack := \emptyset \\ got := \emptyset \end{array} \right]$$

- Phase d'envoi et de réception

$$\text{send} \stackrel{\text{def}}{=} \text{if } \left[ \begin{array}{l} j \in i .. i+l \\ j \leq n \\ j \notin got \end{array} \right] \text{then } [ chan(j) := IN(j) ] \text{ end}$$

$$\text{receive} \stackrel{\text{def}}{=} \text{if } \left[ \begin{array}{l} j \in \text{dom}(chan) \\ j \in i .. i+l \end{array} \right] \text{then } \left[ \begin{array}{l} OUT(j) := chan(j) \\ ack := ack \cup \{j\} \end{array} \right] \text{end}$$

# Phases du protocole

- Phase d'accusé de réception et de complétion

$\text{receiveack} \stackrel{\text{def}}{=} \text{if } [ k \in \text{ack} ] \text{ then } \begin{bmatrix} \text{got} := \text{got} \cup \{k\} \\ \text{ack} := \text{ack} \setminus \{k\} \end{bmatrix} \text{ end}$

$\text{completion} \stackrel{\text{def}}{=} \text{if } [ i = n+1 \wedge \text{got} = \emptyset ] \text{ then } [ \text{skip} ] \text{ end}$

- Gestion de la fenêtre

$\text{sliding} \stackrel{\text{def}}{=}$

$\text{if } \begin{bmatrix} \text{grd1} : \text{got} \neq \emptyset \\ \text{grd3} : i \in \text{got} \\ \text{grd4} : i+l < n \end{bmatrix} \text{ then } \begin{bmatrix} \text{act1} : i := i+1 \\ \text{act2} : \text{got} := \text{got} \setminus \{i\} \\ \text{act3} : \text{ack} := \text{ack} \setminus \{i\} \end{bmatrix} \text{ end}$

La fenêtre ne glisse plus quand elle ne peut plus mais elle se vide et fond en quelque sorte ( $i+l \geq n$ ).

$\text{emptywindow} \stackrel{\text{def}}{=}$

$\text{if } \begin{bmatrix} \text{grd1} : \text{got} \neq \emptyset \\ \text{grd2} : i \in \text{got} \\ \text{grd3} : i+l \geq n \\ \text{grd4} : i \leq n \end{bmatrix} \text{ then } \begin{bmatrix} \text{act1} : i := i+1 \\ \text{act2} : \text{got} := \text{got} \setminus \{i\} \\ \text{act3} : \text{ack} := \text{ack} \setminus \{i\} \end{bmatrix} \text{ end}$

# Pertes de messages sur les deux canaux

---

loosingchan  $\stackrel{def}{=}$

if  $\left[ \begin{array}{l} grd1 : j \in i..i+l \\ grd2 : j \in \text{dom}(chan) \\ grd3 : j \notin \text{got} \end{array} \right]$  then [       $act1 : chan := \{j\} \triangleleft chan$  ] end

loosingack  $\stackrel{def}{=}$

if [       $grd1 : k \in ack$  ] then [       $act1 : ack := ack \setminus \{k\}$  ] end

## Le protocole du bit alterné en TLA<sup>+</sup>

---

- Le protocole du bit alterné est une instance de ce protocole pour  $l = 0$ .
- Le choix de  $l$  est important puisqu'il intervient dans le codage du témoin de transmission.
- On peut imaginer que les choix suivants sont pertinents :
  - ▶  $l = 0$  : codage sur 0 bits
  - ▶  $l = 2$  : codage sur 1 bits
  - ▶  $l = 4$  : codage sur 2 bits
  - ▶  $l = 2^k$  : codage sur  $k$  bits
- Dans le cas d'un codage sur  $k$  bits, on choisit ce qui reste sur la trame d'envoi comme place.

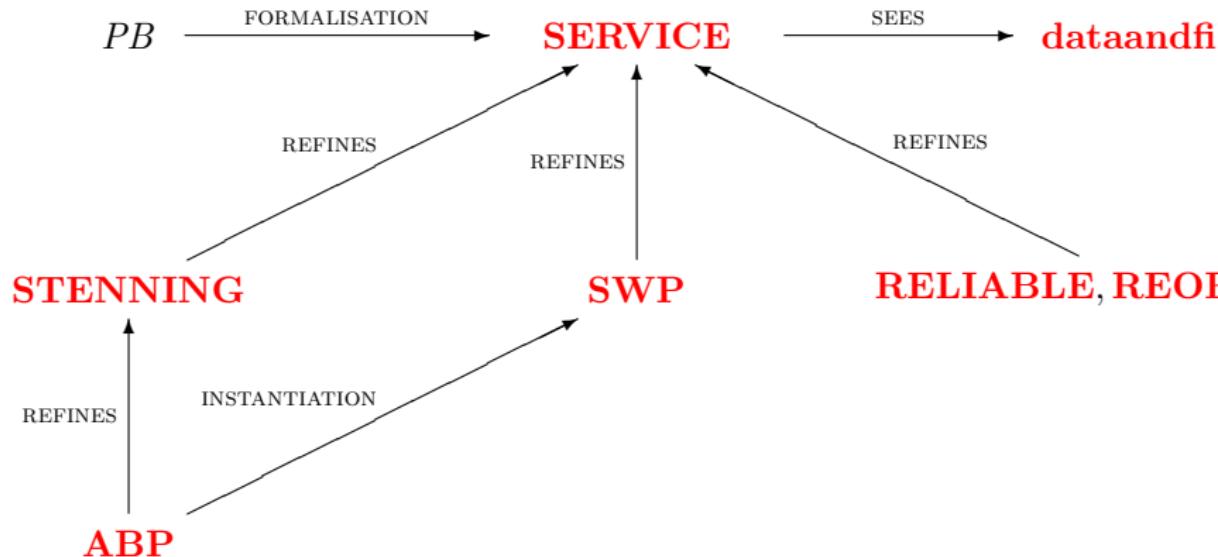
- ① Communications entre processus
- ② Modélisation de protocoles de communication
  - Service d'un protocole
  - Protocole monodirectionnel fiable
  - Protocole fiable avec réordonnancement possible
- ③ Protocole de Stenning
- ④ Protocole ABP
- ⑤ Protocole Sliding Window SWP

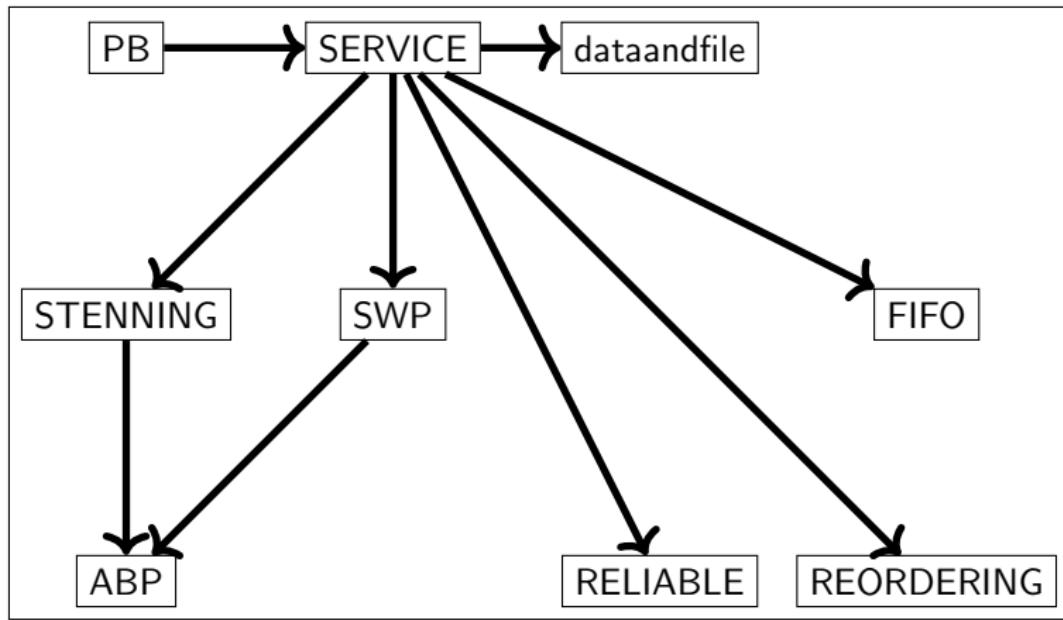
## ⑥ Summary

]

# Status of development

---





# Conclusion

---

- Modèles en couches
- Relation d'abstraction
- Mécanismes de répétition et de contrôle du
- Exemple de TCP/IP

# Transactions

---

- Un protocole de communication est une suite de transactions modifiant des variables d'états.
-

# Transactions

---

- Un protocole de communication est une suite de transactions modifiant des variables d'états.
- 
- Initialisation du protocole

$$\text{INITIALISATION} \stackrel{\text{def}}{=} \left[ \begin{array}{l} OUT := \emptyset \\ i := 0 \\ chan := \emptyset \\ ack := \emptyset \\ got := \emptyset \end{array} \right]$$

# Transactions

---

- Un protocole de communication est une suite de transactions modifiant des variables d'états.
- 
- Initialisation du protocole

$$\text{INITIALISATION} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} OUT := \emptyset \\ i := 0 \\ chan := \emptyset \\ ack := \emptyset \\ got := \emptyset \end{bmatrix}$$

- Phase d'envoi et de réception

$$\text{send} \stackrel{\text{def}}{=} \text{if } \begin{bmatrix} j \in i .. i+l \\ j \leq n \\ j \notin got \end{bmatrix} \text{ then } [ chan(j) := IN(j) ] \text{ end}$$

# Transactions

---

- Un protocole de communication est une suite de transactions modifiant des variables d'états.
- 
- Initialisation du protocole

$$\text{INITIALISATION} \stackrel{\text{def}}{=} \left[ \begin{array}{l} OUT := \emptyset \\ i := 0 \\ chan := \emptyset \\ ack := \emptyset \\ got := \emptyset \end{array} \right]$$

- Phase d'envoi et de réception

$\text{send} \stackrel{\text{def}}{=} \text{if } \left[ \begin{array}{l} j \in i .. i+l \\ j \leq n \\ j \notin got \end{array} \right] \text{ then } [ chan(j) := IN(j) ] \text{ end}$

$\text{receive} \stackrel{\text{def}}{=} \text{if } \left[ \begin{array}{l} j \in \text{dom}(chan) \\ j \in i .. i+l \end{array} \right] \text{ then } \left[ \begin{array}{l} OUT(j) := chan(j) \\ ack := ack \cup \{j\} \end{array} \right] \text{ end}$

- Un protocole de communication est une suite de transactions qui peuvent être définies comme des actions ou événements.
- Le service d'un protocole de communication est de communiquer des données dans de bonnes conditions (pas de pertes, pas de disparition de messages, pas d'altération des messages, ...)
- Exemple du formalisme Alice & Bob qui couvre les protocoles cryptographiques.