Cours ASPD
Protocoles de Communications
Telecom Nancy 2A IL

Dominique Méry
Telecom Nancy
Université de Lorraine

Année universitaire 2024-2025
12 mai 2025(4:09pm)

Sommaire

Section Courante

]

Problèmes des communications

- La communication de données entre deux entités est en général non fiable
- Le support physique de communication peut perdre, dupliquer, réordonnancer 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 raffienment 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 rationnel et permettre de maîtriser l'architecture et d'éviter la cohabitation dans une meêm couche de fonctions très différentes.

Couches OSI

- **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 ls 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

Section Courante

Etat courant

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$^+$ à partir d'une description des actions en Event-B.

Choix de modélisation

- Donner le ≪ quoi ≫ : spécification de ce que fait le protocle

Choix de modélisation

- Donner le ≪ quoi ≫ : spécification de ce que fait le protocle
  - 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 protocle
  - 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 protocle
  - 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

- $u_0 \xrightarrow{\mathsf{e}_0} u_1 \xrightarrow{\mathsf{e}_1} \ldots \xrightarrow{\mathsf{e}_{i-1}} u_i \xrightarrow{\mathsf{e}_i} u_{i+1} \xrightarrow{\mathsf{e}_{i+1}} \ldots$
- e_0 ou e_1 ou $\ldots$ ou e_{i-1} ou e_i ou e_{i+1} ou $\ldots$
- $\mathsf{e} \in \{\mathsf{e}_0, \mathsf{e}_1, \ldots, \mathsf{e}_{i-1}, \mathsf{e}_i, \mathsf{e}_{i+1}, \ldots\}$
- $\mathsf{e} \in E$: E est l'ensemble fini des actions ou des événements observés sur le système modifiant l'état courant.
- $u_0 \xrightarrow{\mathsf{g}} \ldots \xrightarrow{\mathsf{f}} u \xrightarrow{\mathsf{e}} u' \xrightarrow{\mathsf{g}} \ldots$
- Chaque événement modélise la transformation d'une liste de variables d'états appelées *frame* et notée u :

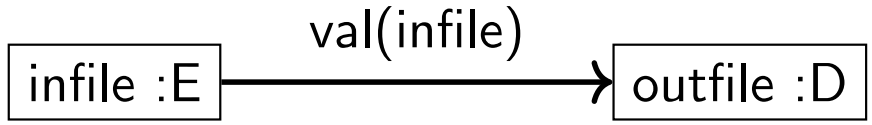
$$\textbf{if } cond(u) \textbf{ then } u := f(u) \textbf{ fi}$$

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



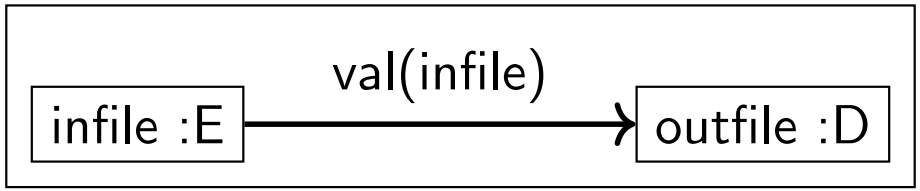
- Un service associé à un protocole de communication revient à effectuer une affectation du type :

```
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 :
    - $n \in \mathbb{N}_1$
    - $infile \in 1 \,..\, n \rightarrow$ 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
- $inv1 : outfile \in 1 \,..\, n \nrightarrow DATA$: pendant la transmission, $outfile$ contient une partie des données et n'a pas tout reçu.

Service du protocole

- communication $\stackrel{def}{=}$ begin $outfile := infile$ 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 :

Service du protocole

- communication $\stackrel{def}{=}$ begin $outfile := infile$ 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,

Service du protocole

- communication $\stackrel{def}{=}$ begin $outfile := infile$ 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,

Service du protocole

- communication $\stackrel{def}{=}$ begin $outfile := infile$ 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,

Service du protocole

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

Observation des communications

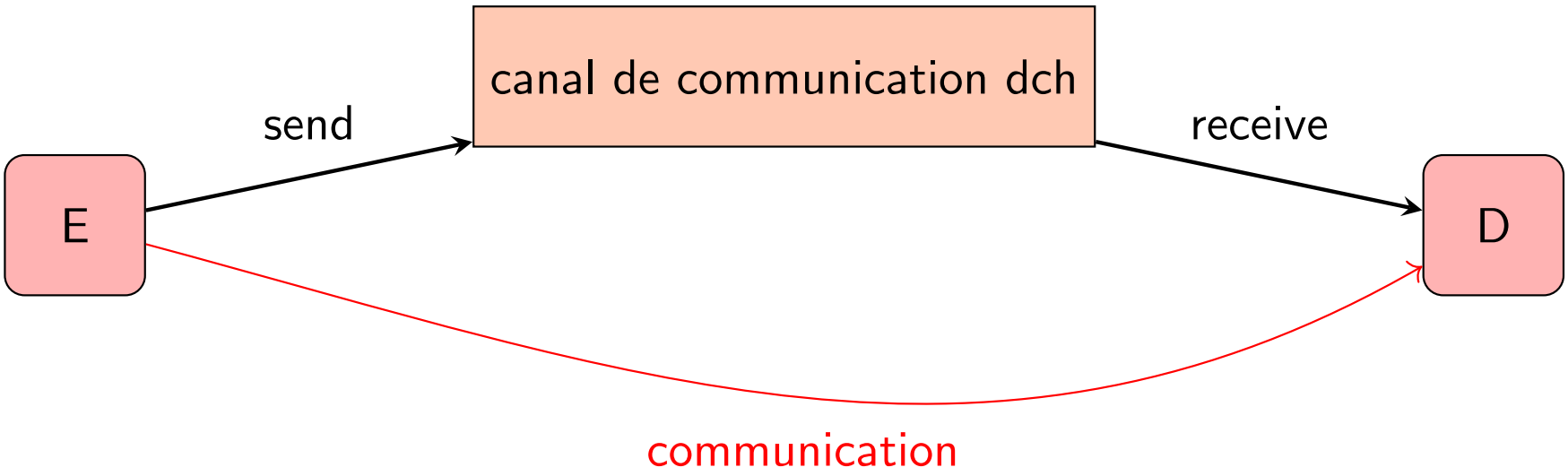
Le protocole de communication est construit selon des hypothèses de l'environnement : hostilité, fautes, pertes, mensonges ...

Etat courant

Hypothèse 1 : Protocole monodirectionnel fiable

- 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 physqiue

Modélisation du protocole monodirectionnel fiable



- E envoie à D par le canald e 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

Modélisation du protocole monodirectionnel fiable

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

$$
\begin{array}{l}
inv1 : outfile \in 1 \mathinner{..} n \pfun DATA \\
inv2 : r \in 0 \mathinner{..} n \\
inv3 : s \in 1 \mathinner{..} n{+}1 \\
inv4 : r \leq s \\
inv5 : dch \in 1 \mathinner{..} n \pfun DATA \\
inv6 : outfile = 1 \mathinner{..} r \domrestrict infile \\
inv7 : dch \subseteq 1 \mathinner{..} s{-}1 \domrestrict infile \\
inv8 : outfile \subseteq dch
\end{array}
$$

- (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 $\stackrel{def}{=} \left(\begin{array}{l} outfile := \varnothing \\ r := 0 \\ s := 1 \\ dch := \varnothing \end{array} \right)$
- transmissionover $\stackrel{def}{=}$ if $r = n$ then skip end
- sendingdata $\stackrel{def}{=}$ if $s \leq n$ then $\left[\begin{array}{l} dch(s) := infile(s) \\ s := s+1 \end{array} \right]$ end
- receivingdata $\stackrel{def}{=}$
  if $r+1 \in dom(dch)$ then $\left[\begin{array}{l} outfile(r+1) := dch(r+1) \\ r := r+1 \end{array} \right]$

Protocole FIFO-FIABLE

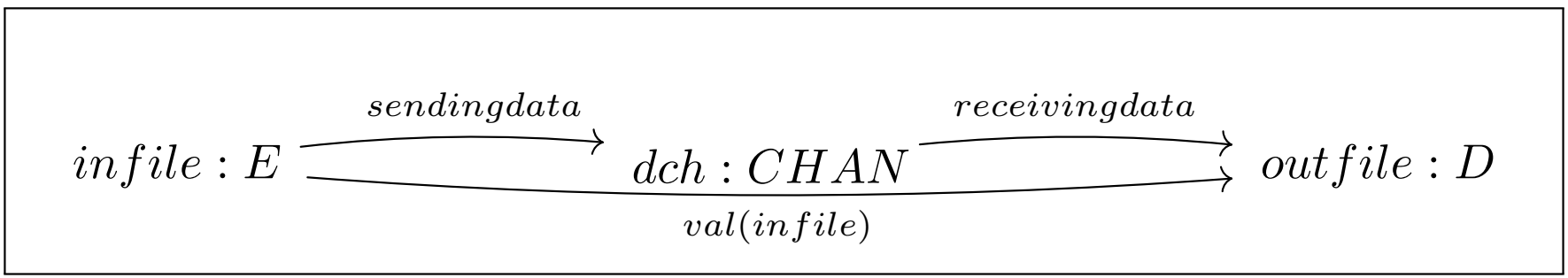
- E :: if $s \leq n$ then $dch(s), s := infile(s), s{+}1$ fi
- D :: if $r{+}1 \in dom(dch)$ then $outfile(r{+}1), r := dch(r{+}1), r{+}1$ fi

k

- E :: if $s \leq n$ then $\left\{ \begin{array}{l} \texttt{send}\ infile(s)\ \texttt{to}\ D\ \texttt{in}\ dch \\ s := s{+}1 \end{array} \right.$ fi
- D :: if $r{+}1 \in dom(dch)$ then $\left\{ \begin{array}{l} \texttt{receive}\ \ dch(r{+}1)\ \ \texttt{in}\ \ ioutfile(r{+}1) \\ r := r{+}1 \end{array} \right.$ fi p

Sommaire du protocole

- E :: if $s \leq n$ then $\left\{ \begin{array}{l} \texttt{send}\ infile(s)\ \texttt{to}\ D\ \texttt{in}\ dch \\ s := s{+}1 \end{array} \right.$ fi
- D :: if $r{+}1 \in dom(dch)$ then $\left\{ \begin{array}{l} \texttt{receive}\ dch(r{+}1)\ \texttt{in}\ outfile(r{+}1) \\ r := r{+}1 \end{array} \right.$ fi



Etat courant

fiable avec réordonnancement possible

- variables *outfile*, *s*, *dch*
- invariants

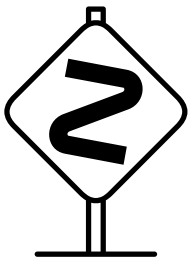
$$inv1 : s \in 1 \,..\, n{+}1$$
$$inv2 : dch \in 1 \,..\, n \nrightarrow DATA$$
$$inv4 : dom(dch) \cap dom(outfile) = \varnothing$$
$$inv3 : dch \cup outfile = 1 \,..\, (s{-}1) \lhd infile$$

Modélisation du protocole fiable avec réordonnancement possible

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

Modélisation du protocole fiable avec ou sans réordonnancement

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



Prise en compte des pertes de messages.

Section Courante

]

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 physqiue
  - SENDING(trameack,eme) via la couche physique

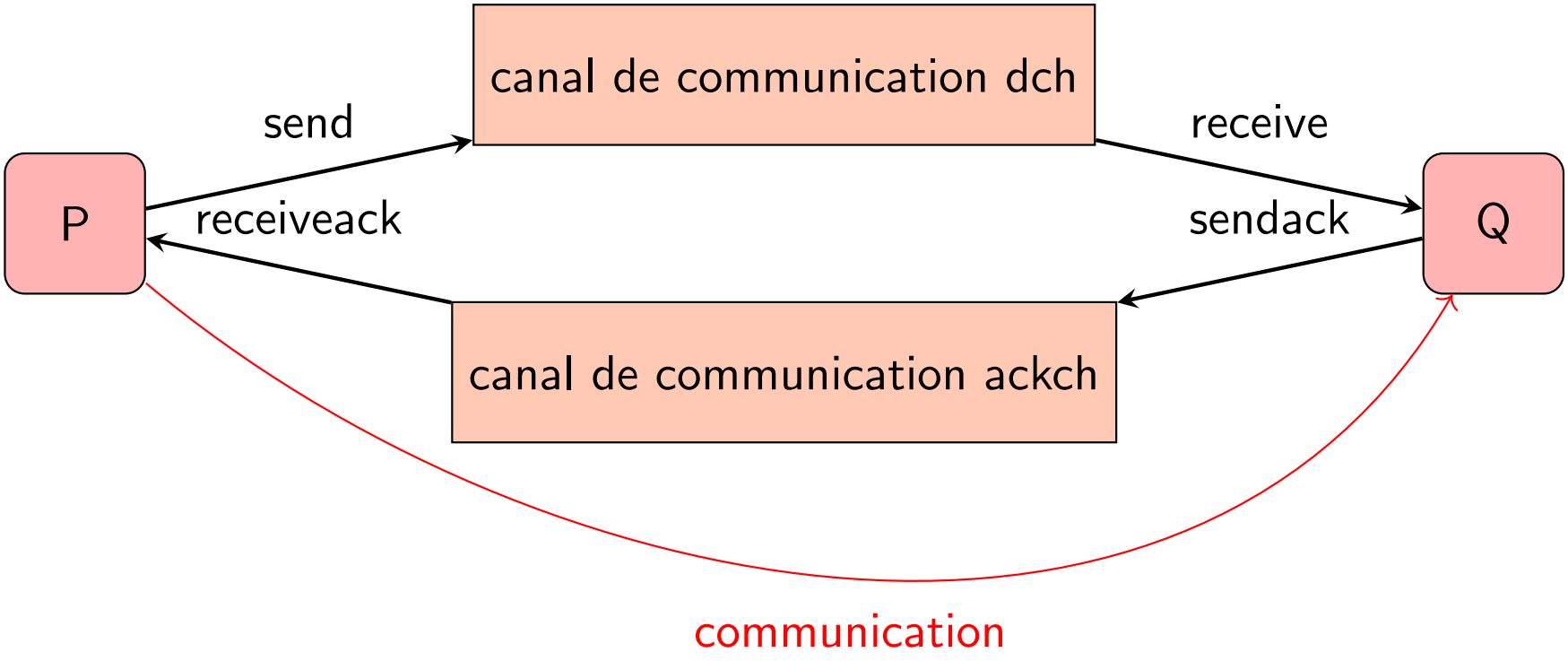
Protocole fiable avec attente

- 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 physqiue
  - 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-émissiond e 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 numérod e trame reçue

Protocole de Stenning



- Soient deux entités P et Q : P veut envoyer des messages à Q
- P envoie une suite de données $d_1, \ldots, d_n$ 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 protocle reprend à la phase d'envoi

Protocole de Stenning

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

$$inv1 : r \in 0 \mathinner{..} n$$
$$inv2 : s \in 1 \mathinner{..} n{+}1$$
$$inv3 : dch \in 1 \mathinner{..} n \pfun DATA$$
$$inv4 : ackch \subseteq 1 \mathinner{..} n$$
$$inv5 : r \leq s$$
$$inv6 : s \leq r{+}1$$
$$inv7 : outfile = 1 \mathinner{..} r \domrest infile$$
$$inv8 : dch \subseteq 1 \mathinner{..} s \domrest infile$$

- $inv9 : s \leq n{+}1$

$$inv10 : r \leq n$$
$$inv11 : outfile \in 1 \mathinner{..} n \pfun DATA$$
$$inv12 : s \notin dom(outfile) \Rightarrow s = r{+}1$$
$$inv13 : s \in dom(outfile) \Rightarrow s = r$$
$$inv14 : s \in ackch \Rightarrow s \in dom(outfile)$$
$$inv15 : ackch \subseteq 1 \mathinner{..} r$$

THEOREMS

$$th : r = n \Rightarrow outfile = infile$$ *safety property*

Protocole de Stenning

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

Protocole de Stenning

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

Section Courante

]

Protocole ABP (AlternatingBitProtocol)

- 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 sir la trame est effectiveùent répétée et reçue in fine.

Section Courante

]

Protocole bidirectionnel à fenêtre de taille n

- Ce protocole est aussi appelé le protocole du *sliding window protocol*
- Le protocole précedent 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

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

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

$axm3 : dom(IN) = 0 \upto n$

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

$axm5 : l \leq n$

END

PROCESSUS Sliding-Window Protocol

VARIABLES : OUT, i , chan, ack, got

$$inv1 : OUT \in \mathbb{N} \nrightarrow D$$
$$inv2 : i \in 0 \mathinner{..} n{+}1$$
$$inv3 : 0 \mathinner{..} i{-}1 \subseteq dom(OUT)$$
$$inv3bis : dom(OUT) \subseteq 0 \mathinner{..} n$$
$$inv7 : chan \in \mathbb{N} \nrightarrow D$$
$$inv8 : ack \subseteq \mathbb{N}$$
$$inv9 : ack \cup got \subseteq i \mathinner{..} i{+}l \cap 0 \mathinner{..} n$$
$$inv10 : got \subseteq \mathbb{N}$$
$$inv12 : dom(chan) \subseteq 0 \mathinner{..} i{+}l \cap 0 \mathinner{..} n$$
$$inv13 : got \subseteq dom(OUT)$$
$$inv14 : ack \subseteq dom(OUT)$$
$$inv16 : 0 \mathinner{..} i{-}1 \lhd OUT = 0 \mathinner{..} i{-}1 \lhd IN$$
$$inv17 : chan \subseteq IN$$
$$inv18 : OUT \subseteq IN \land got \subseteq dom(chan)$$

PROCESSUS Sliding-Window Protocol

VARIABLES : OUT, i , chan, ack, got

$$inv1 : OUT \in \mathbb{N} \nrightarrow D$$
$$inv2 : i \in 0 \mathinner{..} n{+}1$$
$$inv3 : 0 \mathinner{..} i{-}1 \subseteq dom(OUT)$$
$$inv3bis : dom(OUT) \subseteq 0 \mathinner{..} n$$
$$inv7 : chan \in \mathbb{N} \nrightarrow D$$
$$inv8 : ack \subseteq \mathbb{N}$$
$$inv9 : ack \cup got \subseteq i \mathinner{..} i{+}l \cap 0 \mathinner{..} n$$
$$inv10 : got \subseteq \mathbb{N}$$
$$inv12 : dom(chan) \subseteq 0 \mathinner{..} i{+}l \cap 0 \mathinner{..} n$$
$$inv13 : got \subseteq dom(OUT)$$
$$inv14 : ack \subseteq dom(OUT)$$
$$inv16 : 0 \mathinner{..} i{-}1 \lhd OUT = 0 \mathinner{..} i{-}1 \lhd IN$$
$$inv17 : chan \subseteq IN$$
$$inv18 : OUT \subseteq IN \land got \subseteq dom(chan)$$

- Idée du protocole : faire glisser une fenêtre

PROCESSUS Sliding-Window Protocol

VARIABLES : OUT, i , chan, ack, got

$$
\begin{array}{l}
inv1 : OUT \in \mathbb{N} \pfun D \\
inv2 : i \in 0 \upto n{+}1 \\
inv3 : 0 \upto i{-}1 \subseteq dom(OUT) \\
inv3bis : dom(OUT) \subseteq 0 \upto n \\
inv7 : chan \in \mathbb{N} \pfun D \\
inv8 : ack \subseteq \mathbb{N} \\
inv9 : ack \cup got \subseteq i \upto i{+}l \cap 0 \upto n \\
inv10 : got \subseteq \mathbb{N} \\
inv12 : dom(chan) \subseteq 0 \upto i{+}l \cap 0 \upto n \\
inv13 : got \subseteq dom(OUT) \\
inv14 : ack \subseteq dom(OUT) \\
inv16 : 0 \upto i{-}1 \domres OUT = 0 \upto i{-}1 \domres IN \\
inv17 : chan \subseteq IN \\
inv18 : OUT \subseteq IN \land got \subseteq dom(chan)
\end{array}
$$

- 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

$$inv1 : OUT \in \mathbb{N} \nrightarrow D$$
$$inv2 : i \in 0 \mathinner{..} n{+}1$$
$$inv3 : 0 \mathinner{..} i{-}1 \subseteq dom(OUT)$$
$$inv3bis : dom(OUT) \subseteq 0 \mathinner{..} n$$
$$inv7 : chan \in \mathbb{N} \nrightarrow D$$
$$inv8 : ack \subseteq \mathbb{N}$$
$$inv9 : ack \cup got \subseteq i \mathinner{..} i{+}l \cap 0 \mathinner{..} n$$
$$inv10 : got \subseteq \mathbb{N}$$
$$inv12 : dom(chan) \subseteq 0 \mathinner{..} i{+}l \cap 0 \mathinner{..} n$$
$$inv13 : got \subseteq dom(OUT)$$
$$inv14 : ack \subseteq dom(OUT)$$
$$inv16 : 0 \mathinner{..} i{-}1 \lhd OUT = 0 \mathinner{..} i{-}1 \lhd IN$$
$$inv17 : chan \subseteq IN$$
$$inv18 : OUT \subseteq IN \wedge got \subseteq dom(chan)$$

- 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

$$
\begin{array}{l}
inv1 : OUT \in \mathbb{N} \pfun D \\
inv2 : i \in 0 \upto n{+}1 \\
inv3 : 0 \upto i{-}1 \subseteq dom(OUT) \\
inv3bis : dom(OUT) \subseteq 0 \upto n \\
inv7 : chan \in \mathbb{N} \pfun D \\
inv8 : ack \subseteq \mathbb{N} \\
inv9 : ack \cup got \subseteq i \upto i{+}l \cap 0 \upto n \\
inv10 : got \subseteq \mathbb{N} \\
inv12 : dom(chan) \subseteq 0 \upto i{+}l \cap 0 \upto n \\
inv13 : got \subseteq dom(OUT) \\
inv14 : ack \subseteq dom(OUT) \\
inv16 : 0 \upto i{-}1 \domr OUT = 0 \upto i{-}1 \domr IN \\
inv17 : chan \subseteq IN \\
inv18 : OUT \subseteq IN \land got \subseteq dom(chan)
\end{array}
$$

- 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

$$inv1 : OUT \in \mathbb{N} \nrightarrow D$$
$$inv2 : i \in 0 \mathinner{..} n{+}1$$
$$inv3 : 0 \mathinner{..} i{-}1 \subseteq dom(OUT)$$
$$inv3bis : dom(OUT) \subseteq 0 \mathinner{..} n$$
$$inv7 : chan \in \mathbb{N} \nrightarrow D$$
$$inv8 : ack \subseteq \mathbb{N}$$
$$inv9 : ack \cup got \subseteq i \mathinner{..} i{+}l \cap 0 \mathinner{..} n$$
$$inv10 : got \subseteq \mathbb{N}$$
$$inv12 : dom(chan) \subseteq 0 \mathinner{..} i{+}l \cap 0 \mathinner{..} n$$
$$inv13 : got \subseteq dom(OUT)$$
$$inv14 : ack \subseteq dom(OUT)$$
$$inv16 : 0 \mathinner{..} i{-}1 \lhd OUT = 0 \mathinner{..} i{-}1 \lhd IN$$
$$inv17 : chan \subseteq IN$$
$$inv18 : OUT \subseteq IN \land got \subseteq dom(chan)$$

- 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

$$inv1 : OUT \in \mathbb{N} \nrightarrow D$$
$$inv2 : i \in 0 \mathinner{..} n{+}1$$
$$inv3 : 0 \mathinner{..} i{-}1 \subseteq dom(OUT)$$
$$inv3bis : dom(OUT) \subseteq 0 \mathinner{..} n$$
$$inv7 : chan \in \mathbb{N} \nrightarrow D$$
$$inv8 : ack \subseteq \mathbb{N}$$
$$inv9 : ack \cup got \subseteq i \mathinner{..} i{+}l \cap 0 \mathinner{..} n$$
$$inv10 : got \subseteq \mathbb{N}$$
$$inv12 : dom(chan) \subseteq 0 \mathinner{..} i{+}l \cap 0 \mathinner{..} n$$
$$inv13 : got \subseteq dom(OUT)$$
$$inv14 : ack \subseteq dom(OUT)$$
$$inv16 : 0 \mathinner{..} i{-}1 \lhd OUT = 0 \mathinner{..} i{-}1 \lhd IN$$
$$inv17 : chan \subseteq IN$$
$$inv18 : OUT \subseteq IN \land got \subseteq dom(chan)$$

- 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

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

- Phase d'envoi et de réception

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

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

Phases du protocole

- Phase d'accusé de réception et de complétion

  receiveack $\stackrel{def}{=}$ if $\left[\ k \in ack\ \right]$ then $\left[\begin{array}{l} got := got \cup \{k\} \\ ack := ack \setminus \{k\} \end{array}\right]$ end

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

- Gestion de la fenêtre

  sliding $\stackrel{def}{=}$

  if $\left[\begin{array}{l} grd1 : got \neq \varnothing \\ grd3 : i \in got \\ grd4 : i{+}l < n \end{array}\right]$ then $\left[\begin{array}{l} act1 : i := i{+}1 \\ act2 : got := got \setminus \{i\} \\ act3 : ack := ack \setminus \{i\} \end{array}\right]$ end

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

  emptywindow $\stackrel{def}{=}$

  if $\left[\begin{array}{l} grd1 : got \neq \varnothing \\ grd2 : i \in got \\ grd3 : i{+}l \geq n \\ grd4 : i \leq n \end{array}\right]$ then $\left[\begin{array}{l} act1 : i := i{+}1 \\ act2 : got := got \setminus \{i\} \\ act3 : ack := ack \setminus \{i\} \end{array}\right]$ end

Pertes de messages sur les deux canaux

$$\text{loosingchan} \stackrel{def}{=}$$
$$\text{if } \left[\begin{array}{l} grd1 : j \in i \,..\, i{+}l \\ grd2 : j \in dom(chan) \\ grd3 : j \notin got \end{array}\right] \text{ then } \left[\quad act1 : chan := \{j\} \lhd chan \quad\right] \text{ en}$$
$$\text{loosingack} \stackrel{def}{=}$$
$$\text{if } \left[\quad grd1 : k \in ack \quad\right] \text{ then } \left[\quad act1 : ack := ack \setminus \{k\} \quad\right] \text{ end}$$

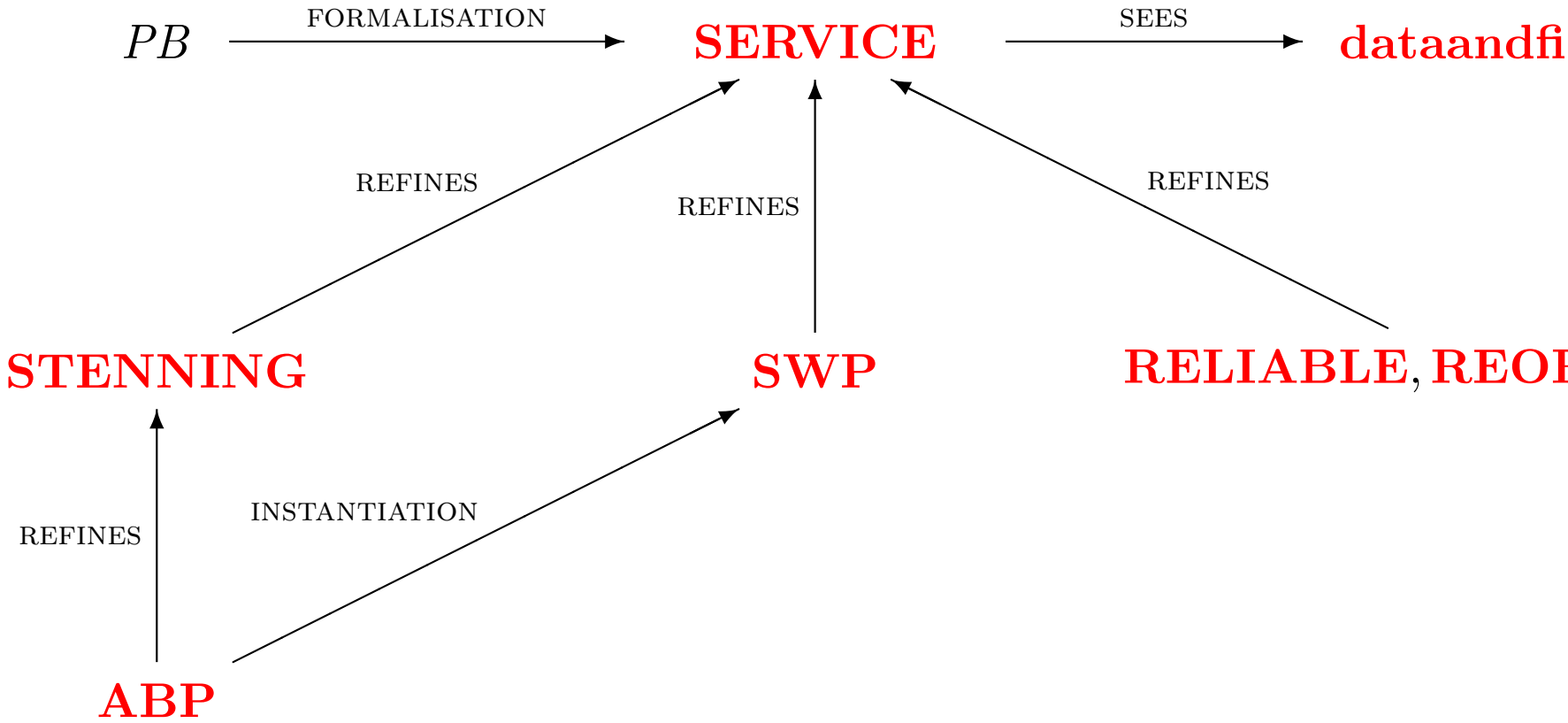
Le protocole du bit alterné en TLA$^+$

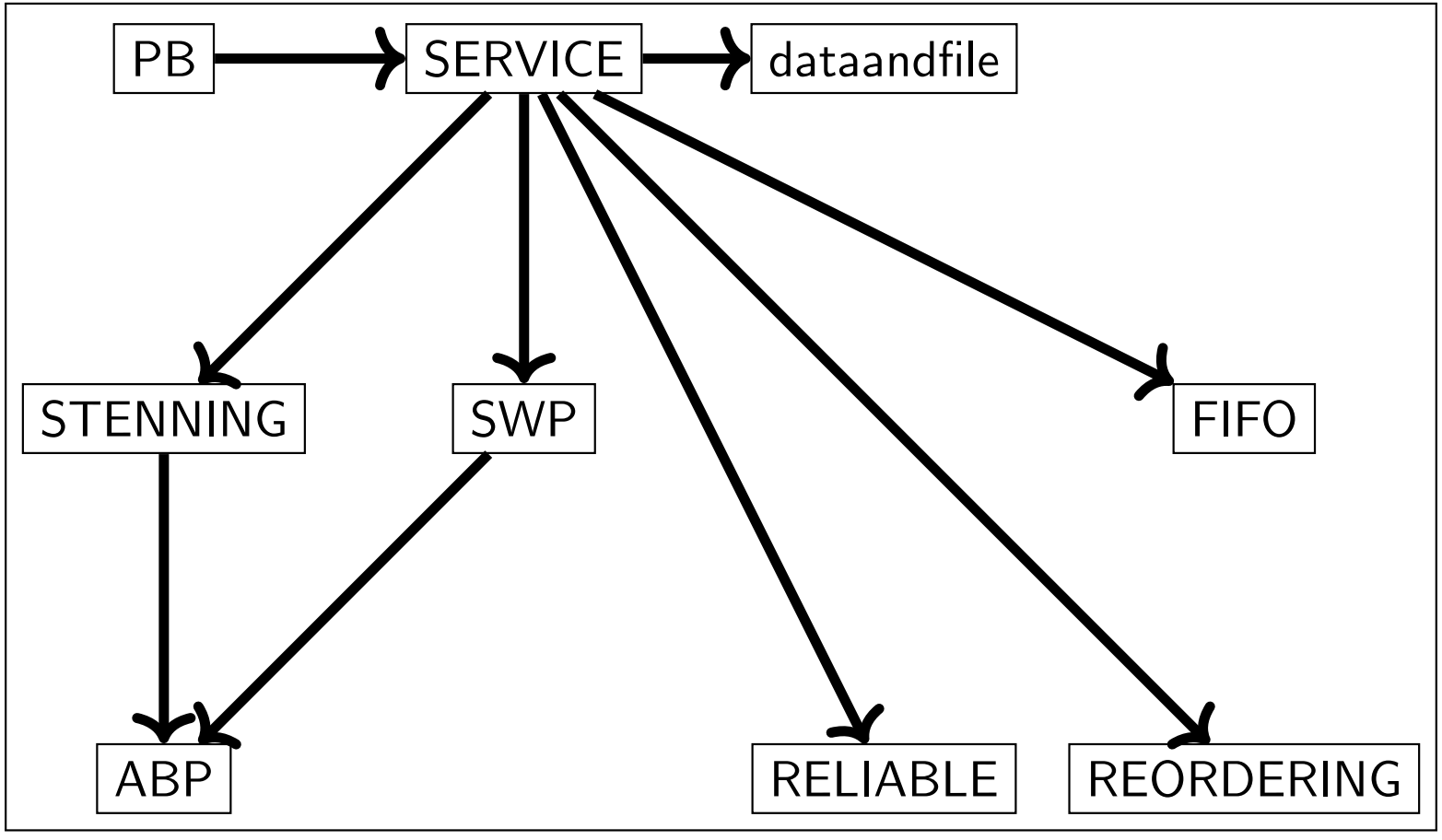
- Le protocole du bit alterné est une instance de ce protocle pour $l = 0$.
- Le choix de l est important puisqu'il intervient dans le codage du témoin de transmission.
- On peut imaginer que les choix suivants sont pertinents :
  - $l = 0$: codage sur 0 bits
  - $l = 2$: codage sur 1 bits
  - $l = 4$: 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.

Section Courante

]

Status of development




PB
SERVICE
dataandfile
STENNING
SWP
FIFO
ABP
RELIABLE
REORDERING

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

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

Transactions

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

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

- Phase d'envoi et de réception

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

Transactions

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

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

- Phase d'envoi et de réception

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

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

Sommaire

- Un protocole de communiaction est une suite de transactions qui peuvent être définies comme des actions ou événements.
- Le service d'un protole de communicatipn 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.