Intégration de modèles de réseaux IP à un multi-modèle DEVS, pour la co-simulation de systèmes cyber-physiques

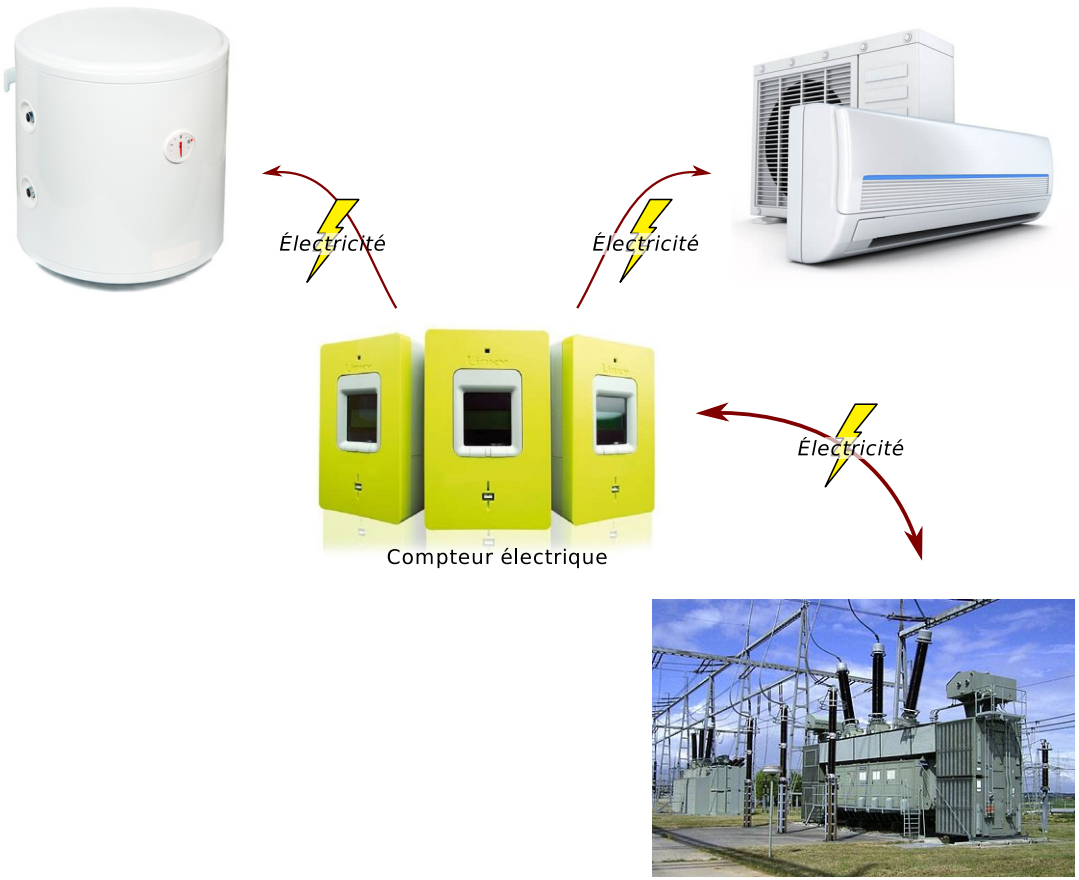
Julien Vaubourg

Thèse pour l'obtention du
Doctorat de l'Université de Lorraine
(mention informatique)

présentée et soutenue publiquement le 25/04/2017

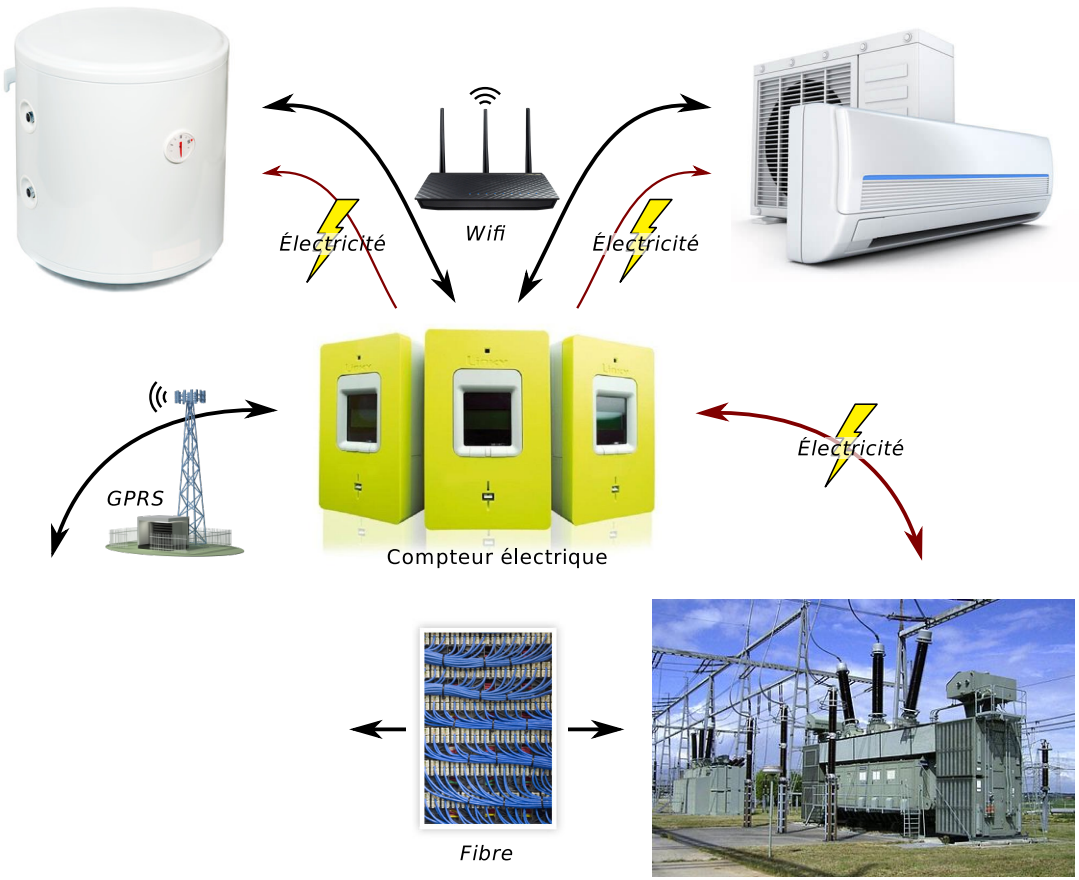
Travaux réalisés dans le cadre d'un partenariat stratégique entre Loria/Inria et EDF R&D

Introduction : Systèmes Cyber-Physiques (SCP)



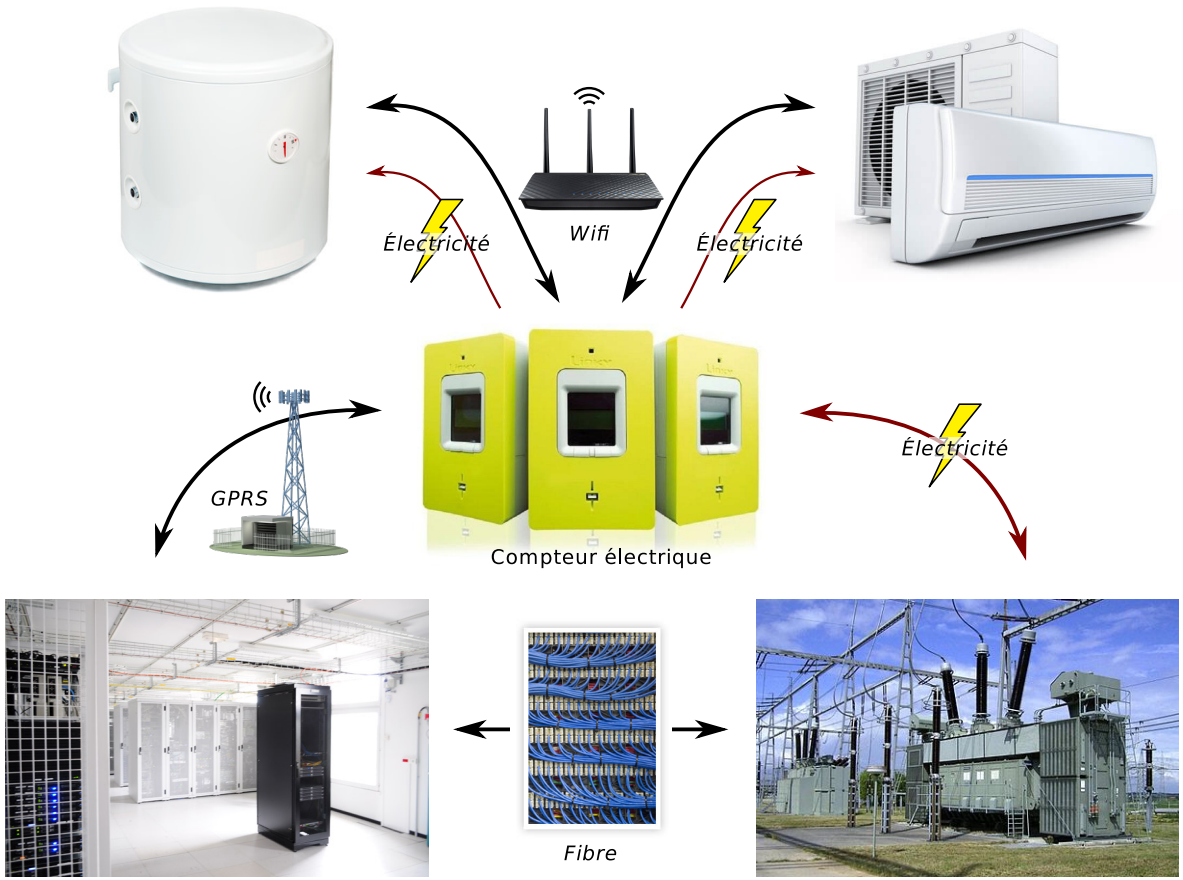
Systèmes physiques

Introduction : Systèmes Cyber-Physiques (SCP)



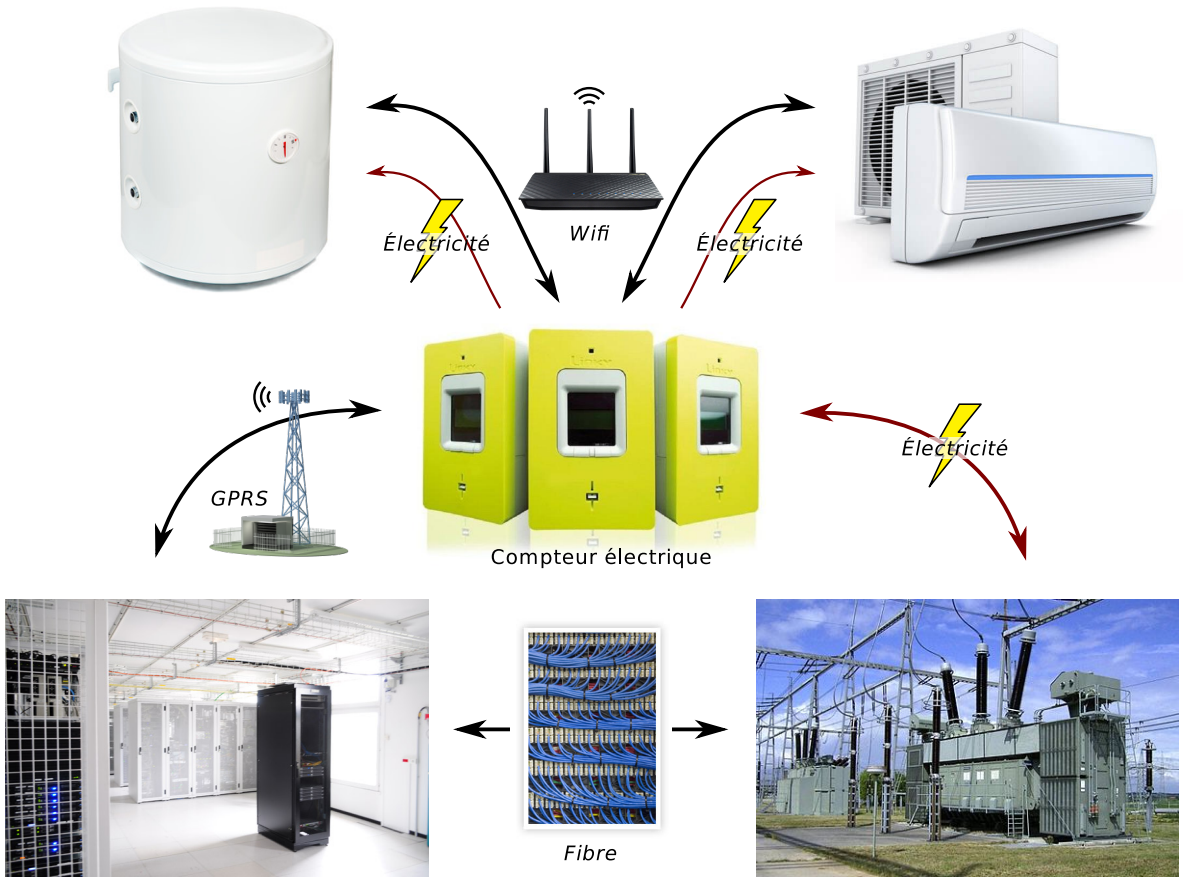
Systèmes physiques, **Réseaux IP**

Introduction : Systèmes Cyber-Physiques (SCP)



Systèmes physiques, Réseaux IP, et **Systèmes d'Information**

Introduction : Systèmes Cyber-Physiques (SCP)



Systèmes physiques, Réseaux IP, et Systèmes d'Information

Introduction : Systèmes Cyber-Physiques (SCP)

Besoin : Modélisation et simulation (M&S) de SCP

- **Pas de simulateur global** de SCP

Introduction : Systèmes Cyber-Physiques (SCP)

Besoin : Modélisation et simulation (M&S) de SCP

- **Pas de simulateur global** de SCP
- Modèles déjà existants et mis à **disposition par les trois communautés** (outils métiers)

Introduction : Systèmes Cyber-Physiques (SCP)

Besoin : Modélisation et simulation (M&S) de SCP

- **Pas de simulateur global** de SCP
- Modèles déjà existants et mis à **disposition par les trois communautés** (outils métiers)
- **Choix :** Intégration des modèles existants dans un **multi-modèle** dans le cadre de la **co-simulation**

Introduction : Systèmes Cyber-Physiques (SCP)

Besoin : Modélisation et simulation (M&S) de SCP

- **Pas de simulateur global** de SCP
- Modèles déjà existants et mis à **disposition par les trois communautés** (outils métiers)
- **Choix :** Intégration des modèles existants dans un **multi-modèle** dans le cadre de la **co-simulation**

Les **simulateurs IP détaillés** ne sont généralement pas conçus pour la co-simulation

Introduction : Systèmes Cyber-Physiques (SCP)

Besoin : Modélisation et simulation (M&S) de SCP

- **Pas de simulateur global** de SCP
- Modèles déjà existants et mis à **disposition par les trois communautés** (outils métiers)
- **Choix :** Intégration des modèles existants dans un **multi-modèle** dans le cadre de la **co-simulation**

Les **simulateurs IP détaillés** ne sont généralement pas conçus pour la co-simulation

$\Longrightarrow$ *Que signifie intégrer un modèle IP à un multi-modèle ?*

Sommaire

Introduction
Problématiques
Hypothèses et pré-requis
Propositions
- Stratégie de wrapping
- Ouvrir les modèles (structurel)
- Ouvrir les modèles (spatial)
- Ouvrir les simulateurs
- Bilan

Validation expérimentale
Cas d'utilisation
- Smart Heating
- Concept Grid

Conclusion
Perspectives

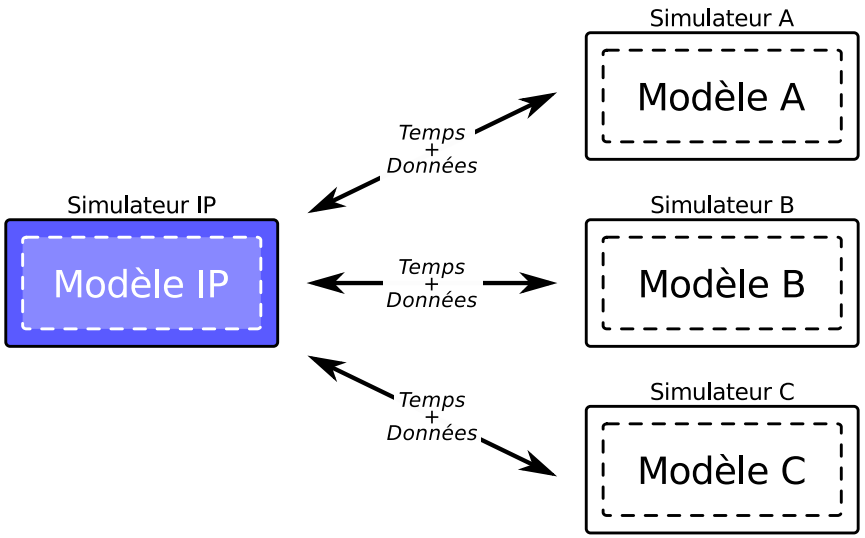
Sommaire

Introduction
Problématiques
Hypothèses et pré-requis
Propositions
- Stratégie de wrapping
- Ouvrir les modèles (structurel)
- Ouvrir les modèles (spatial)
- Ouvrir les simulateurs
- Bilan

Validation expérimentale
Cas d'utilisation
- Smart Heating
- Concept Grid

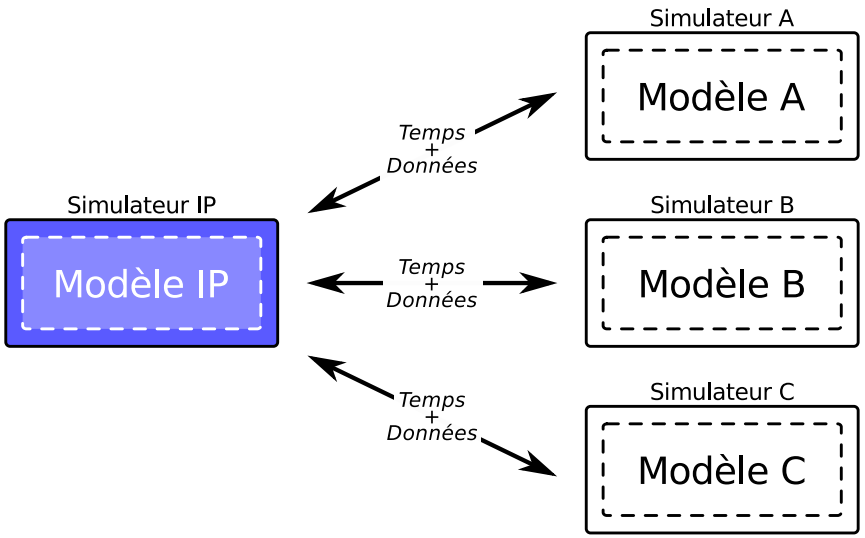
Conclusion
Perspectives

Problématiques : Multi-modèle



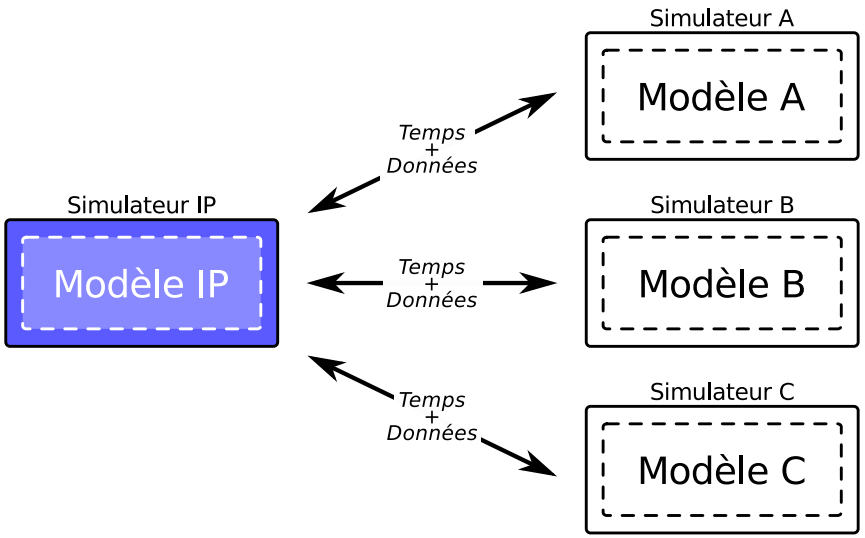
- Interconnexion de **systèmes dynamiques**

Problématiques : Multi-modèle



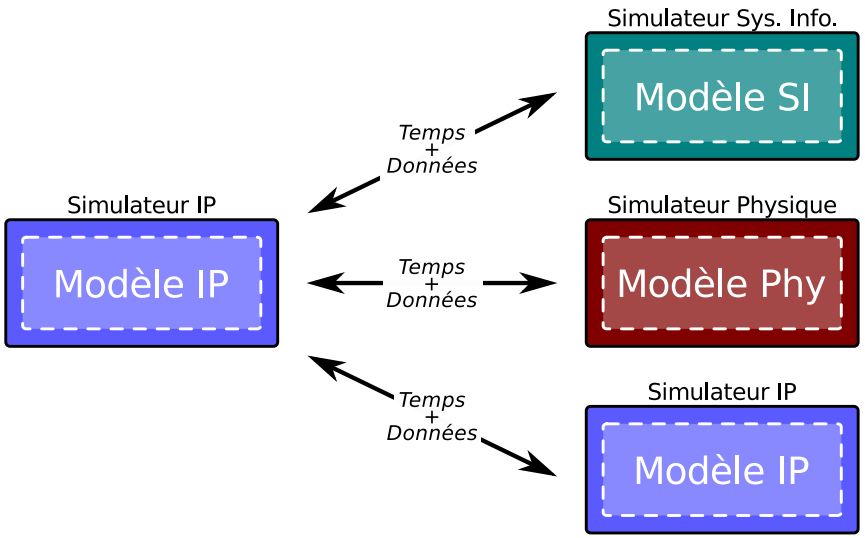
- Interconnexion de **systèmes dynamiques**
- **Synchronisation du temps** de simulation entre les modèles

Problématiques : Multi-modèle



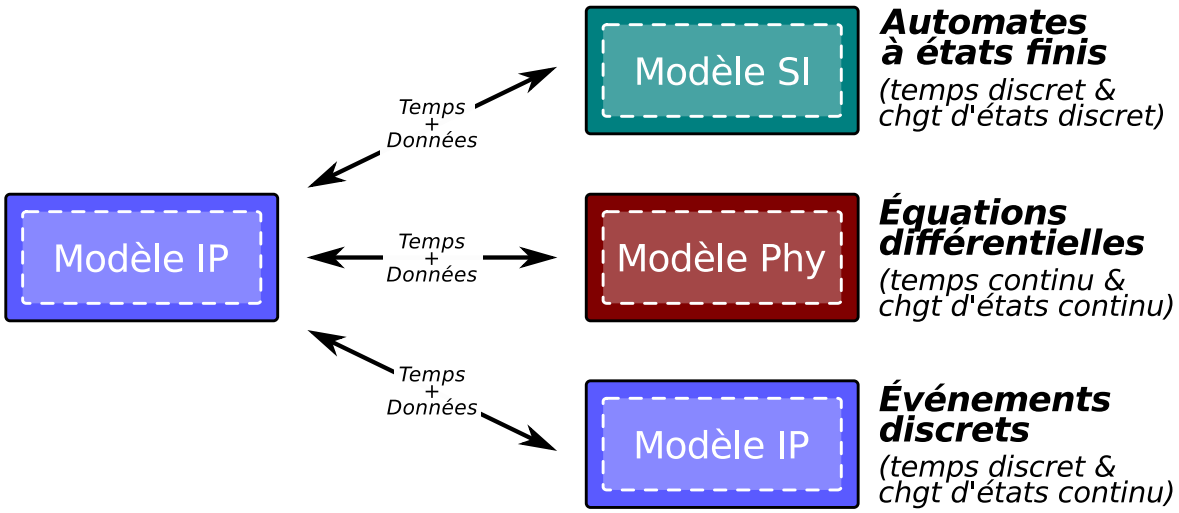
- Interconnexion de **systèmes dynamiques**
- **Synchronisation du temps** de simulation entre les modèles
- **Échanges de données** de simulation datées entre les modèles

Problématiques : Multi-modèle



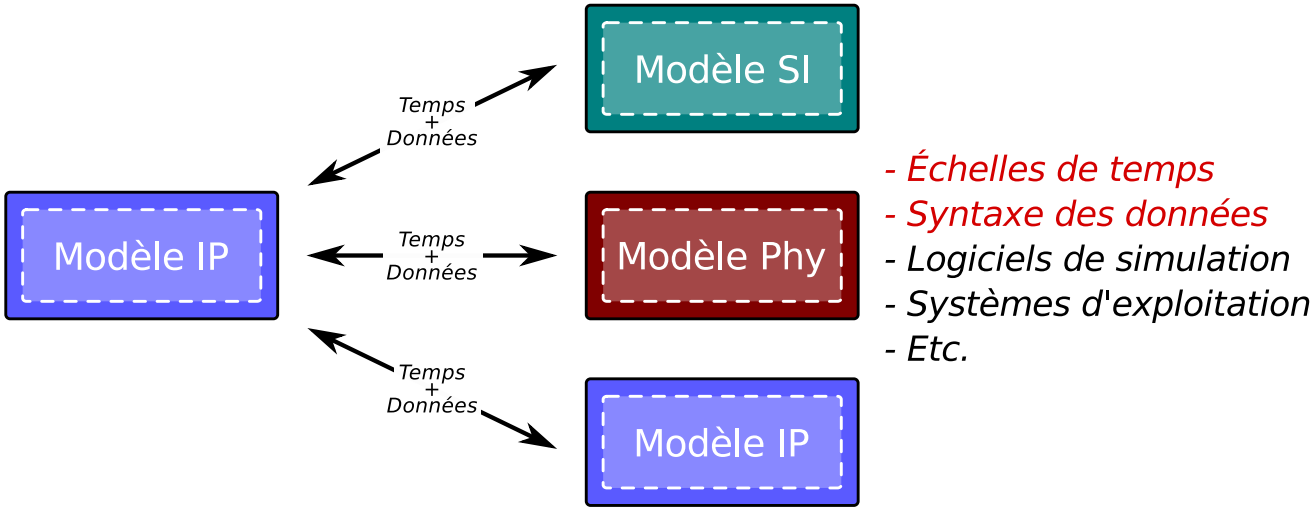
- Interconnexion de **systèmes dynamiques**
- **Synchronisation du temps** de simulation entre les modèles
- **Échanges de données** de simulation datées entre les modèles

Problématiques : Forte hétérogénéité



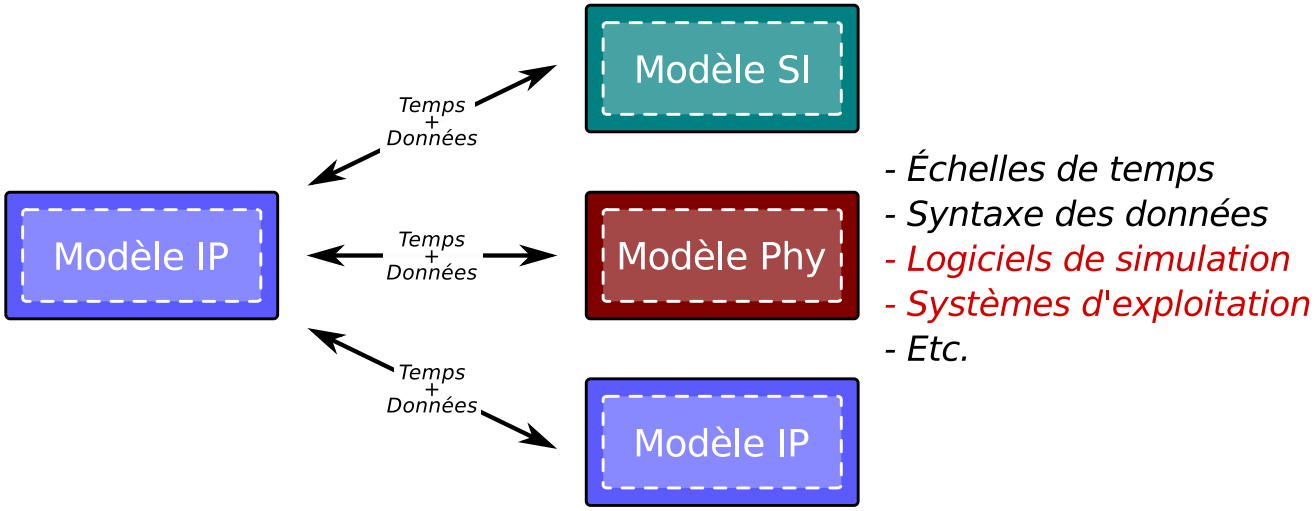
1. Hétérogénéité des **formalismes** [Ramat06]

Problématiques : Forte hétérogénéité



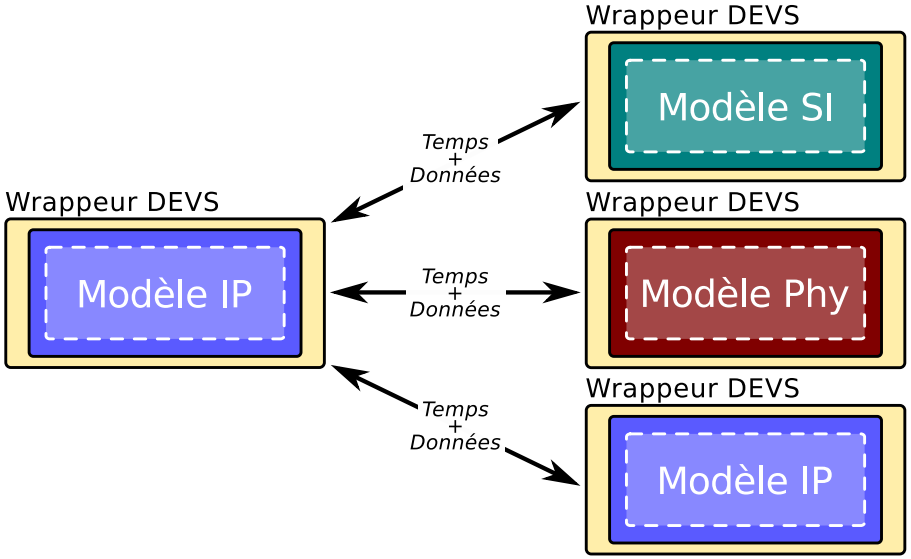
1. Hétérogénéité des **formalismes** [Ramat06]
2. Hétérogénéité des **temps et données**

Problématiques : Forte hétérogénéité



1. Hétérogénéité des **formalismes** [Ramat06]
2. Hétérogénéité des **temps et données**
3. Hétérogénéité des **environnements logiciels**

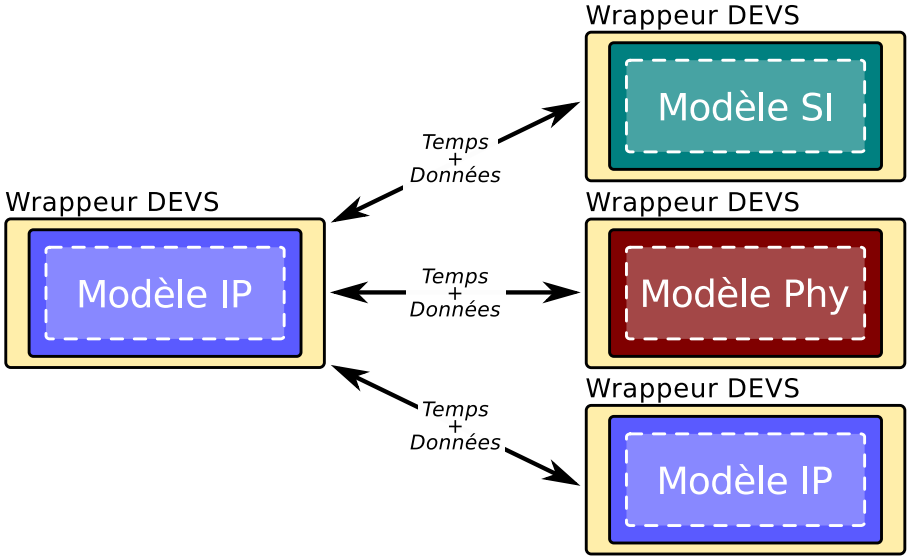
Problématiques : Choix de DEVS [Ziegler00]



DEVS en tant que formalisme commun [Vangheluwe00]

$\Longrightarrow$ résolution des problèmes d'**hétérogénéité des formalismes**

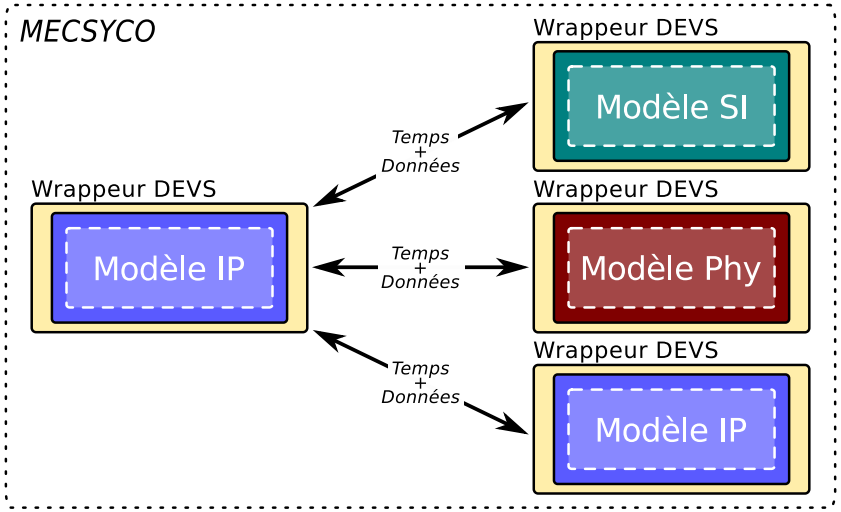
Problématiques : Choix de DEVS [Ziegler00]



DEVS en tant que formalisme commun [Vangheluwe00]
$\Longrightarrow$ résolution des problèmes d'**hétérogénéité des formalismes**

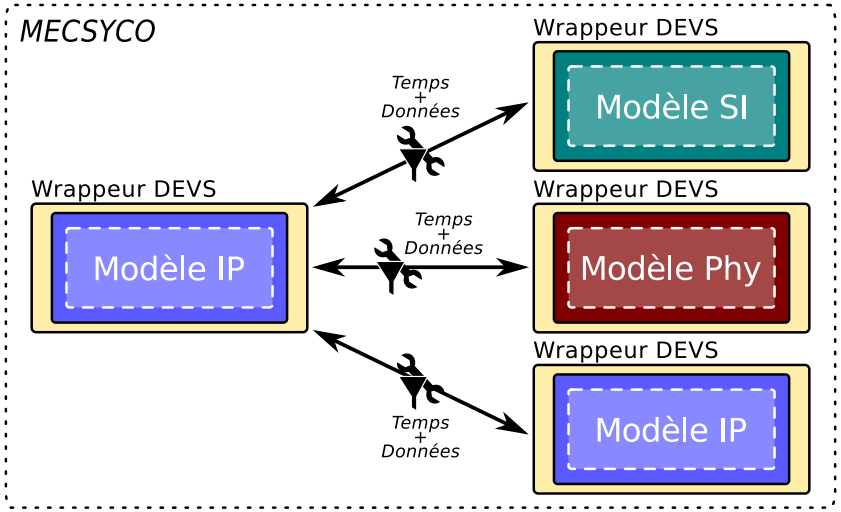
Utilisation de **wrappeurs DEVS** [Quesnel09] avec la plateforme de co-simulation **MECSYCO**

Problématiques : Choix de MECSYCO [Camus15]



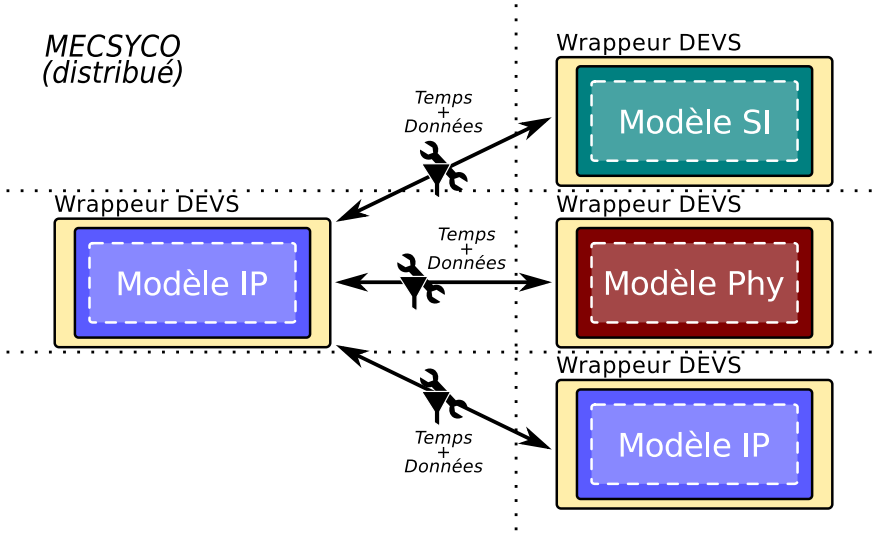
- **Interconnexion et synchronisation** [Chandy79] des modèles

Problématiques : Choix de MECSYCO [Camus15]



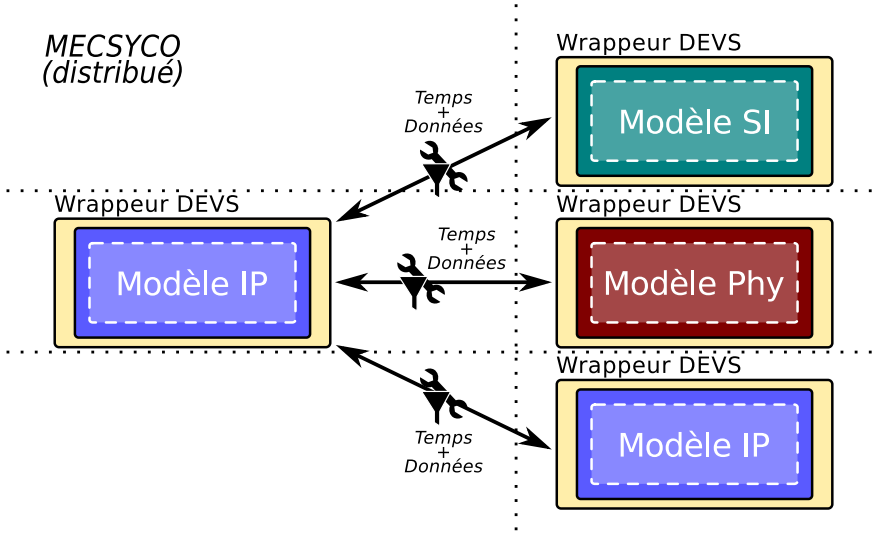
- **Interconnexion et synchronisation** [Chandy79] des modèles
- Résolution des problèmes d'**hétérogénéité des temps et données**

Problématiques : Choix de MECSYCO [Camus15]



- **Interconnexion et synchronisation** [Chandy79] des modèles
- Résolution des problèmes d'**hétérogénéité des temps et données**
- Résolution des problèmes d'**hétérogénéité logicielle**

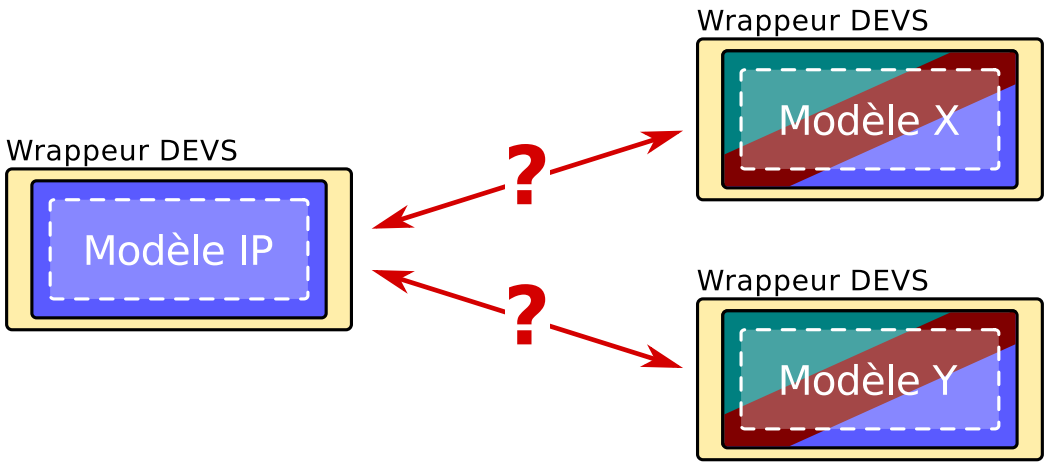
Problématiques : Choix de MECSYCO [Camus15]



- **Interconnexion et synchronisation** [Chandy79] des modèles
- Résolution des problèmes d'**hétérogénéité des temps et données**
- Résolution des problèmes d'**hétérogénéité logicielle**

$\Longrightarrow$ *Que signifie intégrer un modèle IP à un multi-modèle DEVS ?*

Problématiques : Modes d'intégration (intuitif)



Le mode d'intégration dépend de la sémantique du couplage

Nous proposerons **2 formes de couplage**
(expliquées pour l'instant de façon intuitive)

Problématiques : Modes d'intégration (intuitif)

Compteur électrique

Système d'information central

Compteur électrique : **système physique**

Centre de données : **système d'information** (SI)

Problématiques : Modes d'intégration (intuitif)

Compteur électrique
Système d'information local

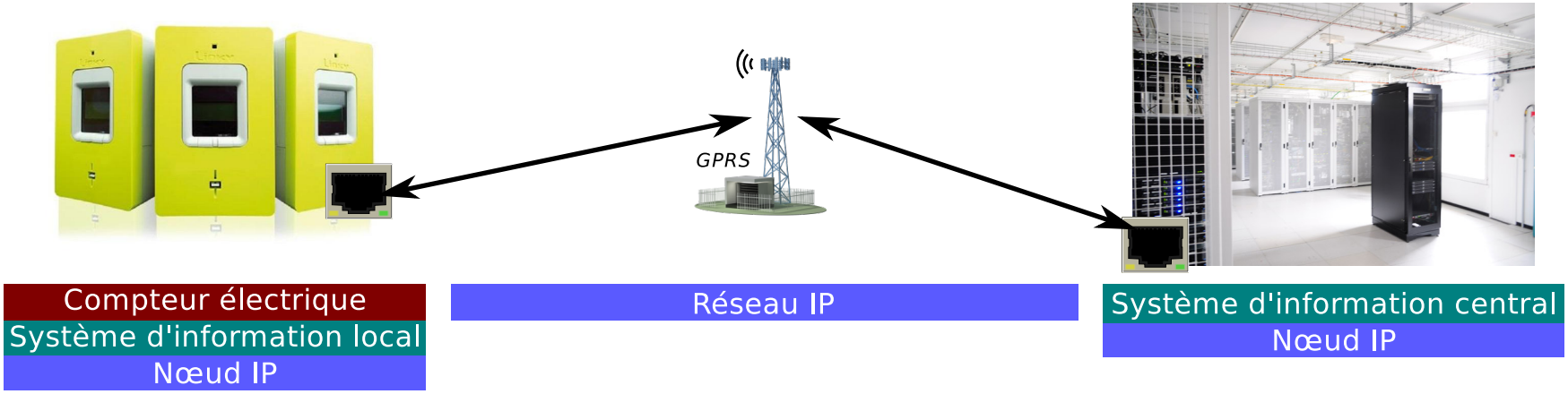
kWh →

← *Configuration*

Système d'information central

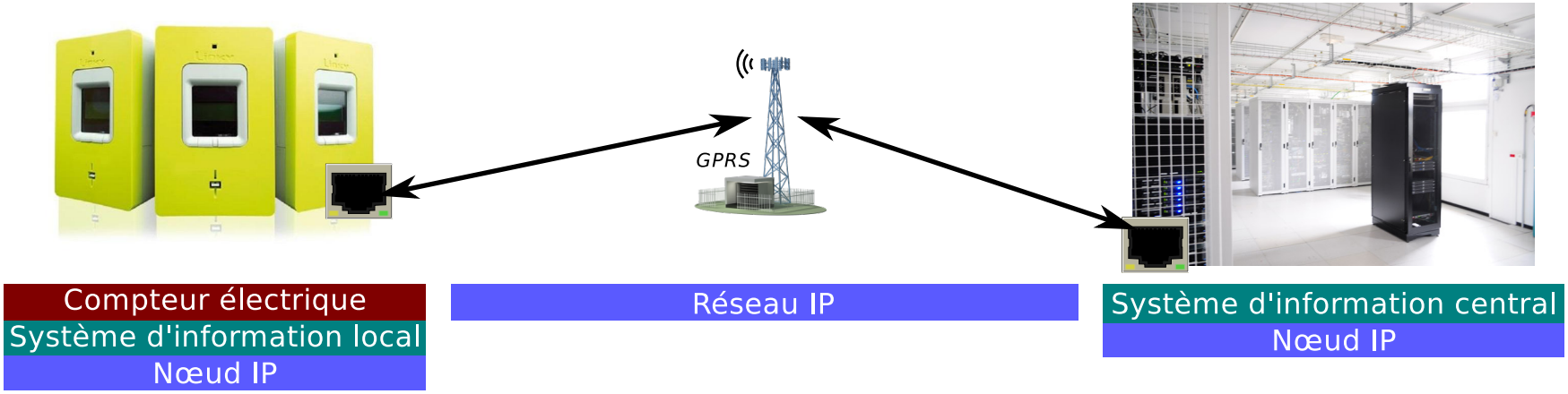
Le compteur échange des informations avec le SI :
c'est donc **aussi une partie de ce SI**

Problématiques : Modes d'intégration (intuitif)



Pour cela les deux composants utilisent un réseau IP :
ce sont donc **aussi des nœuds IP**

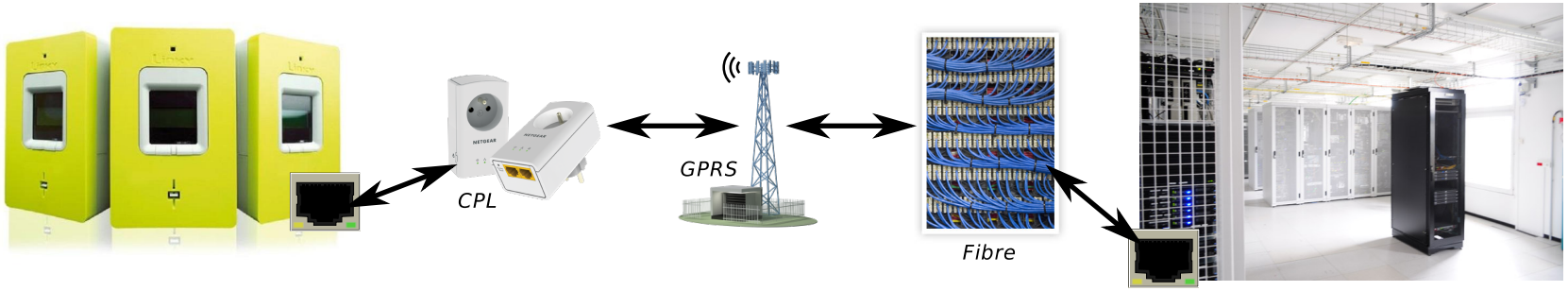
Problématiques : Modes d'intégration (intuitif)



$\Longrightarrow$ Première forme de couplage : **Structurelle**

Objectif : Modéliser une même chose au même instant **selon des points de vue différents**, avec les simulateurs les plus appropriés

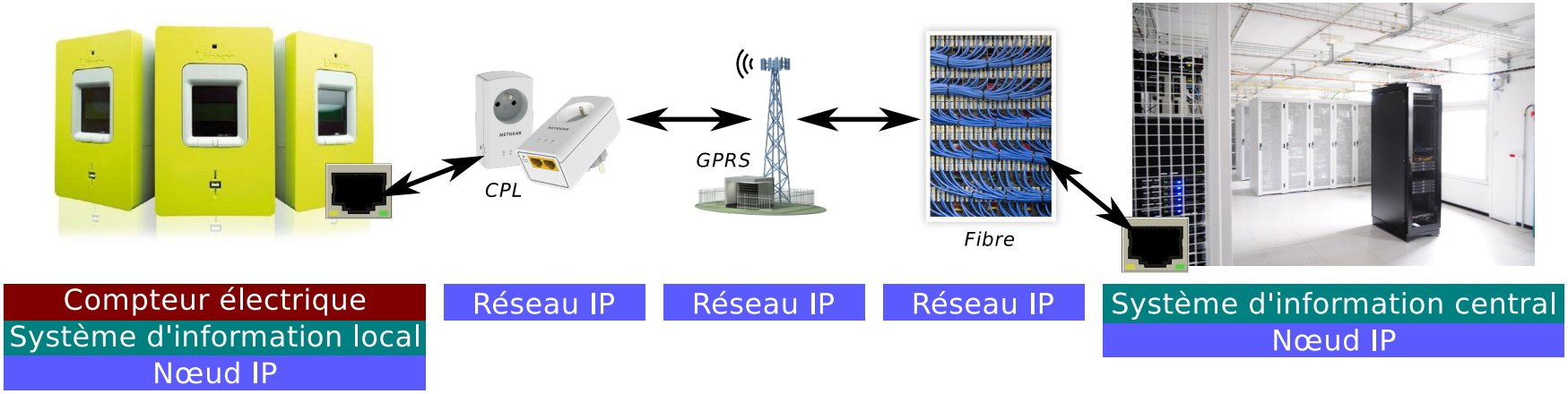
Problématiques : Modes d'intégration (intuitif)



Compteur électrique Système d'information local Nœud IP	Réseau IP	Réseau IP	Réseau IP	Système d'information central Nœud IP

Le réseau IP peut être complexe et combiner des **technologies très variées**

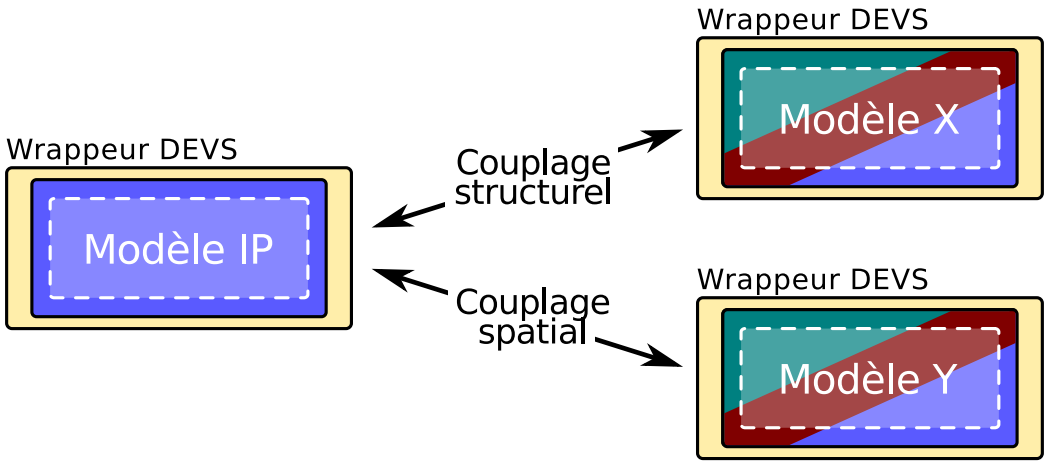
Problématiques : Modes d'intégration (intuitif)



$\Longrightarrow$ Seconde forme de couplage : **Spatiale**

Objectif : Découper la topologie IP, pour **modéliser chaque section individuellement**, avec le simulateur le plus approprié

Problématique principale



Que signifie intégrer structurellement et spatialement un modèle IP à un multi-modèle DEVS ?

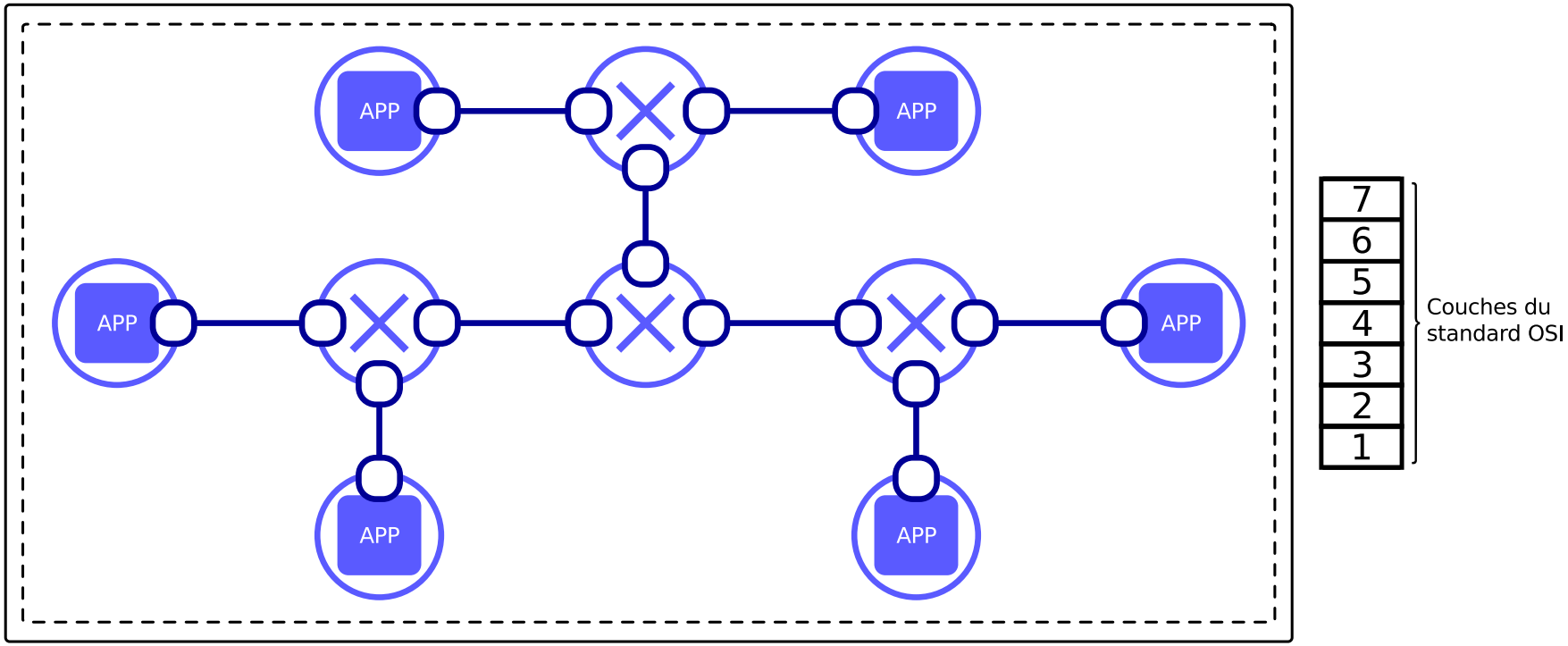
Sommaire

Introduction
Problématiques
Hypothèses et pré-requis
Propositions
- Stratégie de wrapping
- Ouvrir les modèles (structurel)
- Ouvrir les modèles (spatial)
- Ouvrir les simulateurs
- Bilan

Validation expérimentale
Cas d'utilisation
- Smart Heating
- Concept Grid

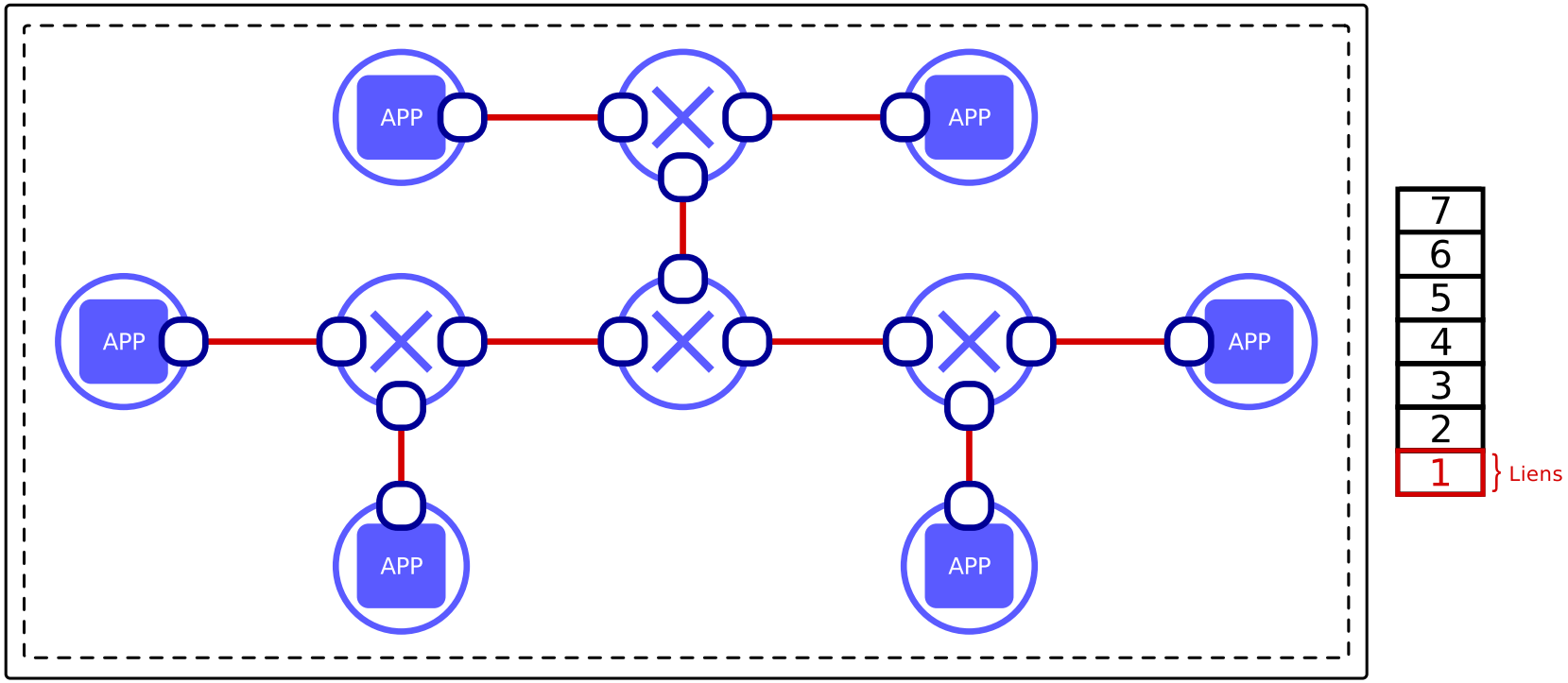
Conclusion
Perspectives

Hypothèses et pré-requis : Modèles IP



Un modèle IP représente une topologie IP **en combinant des sous-modèles** essentiels (7 couches du standard OSI)

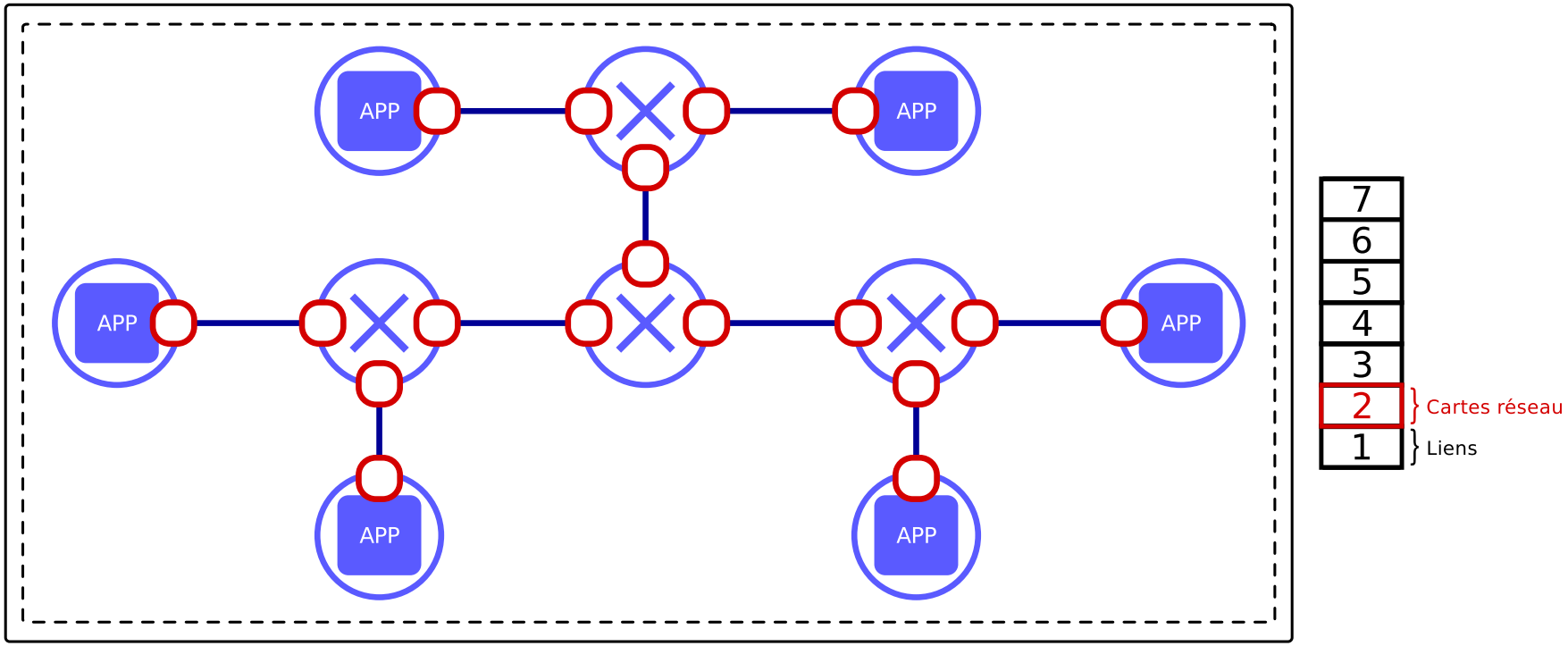
Hypothèses et pré-requis : Modèles IP



Liens

(e.g. fibre, wifi, bluetooth)

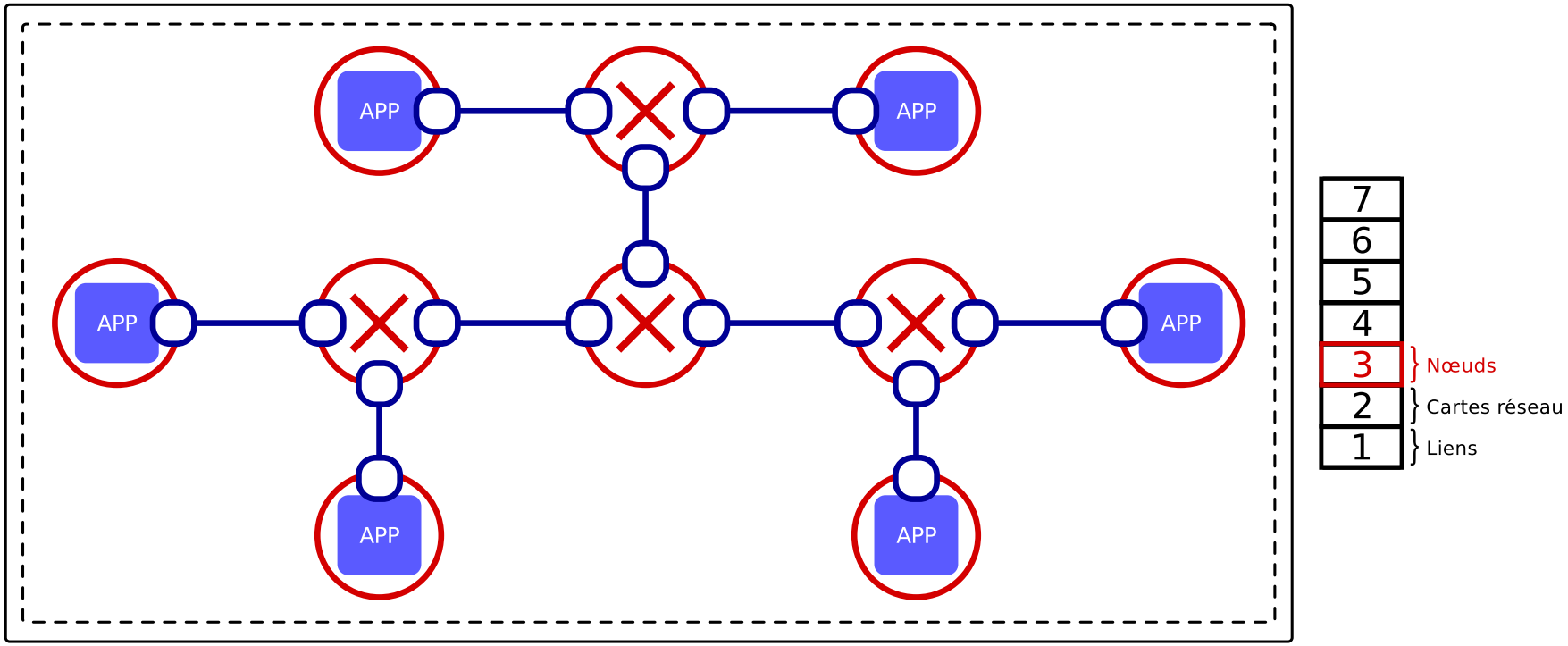
Hypothèses et pré-requis : Modèles IP



Cartes réseau

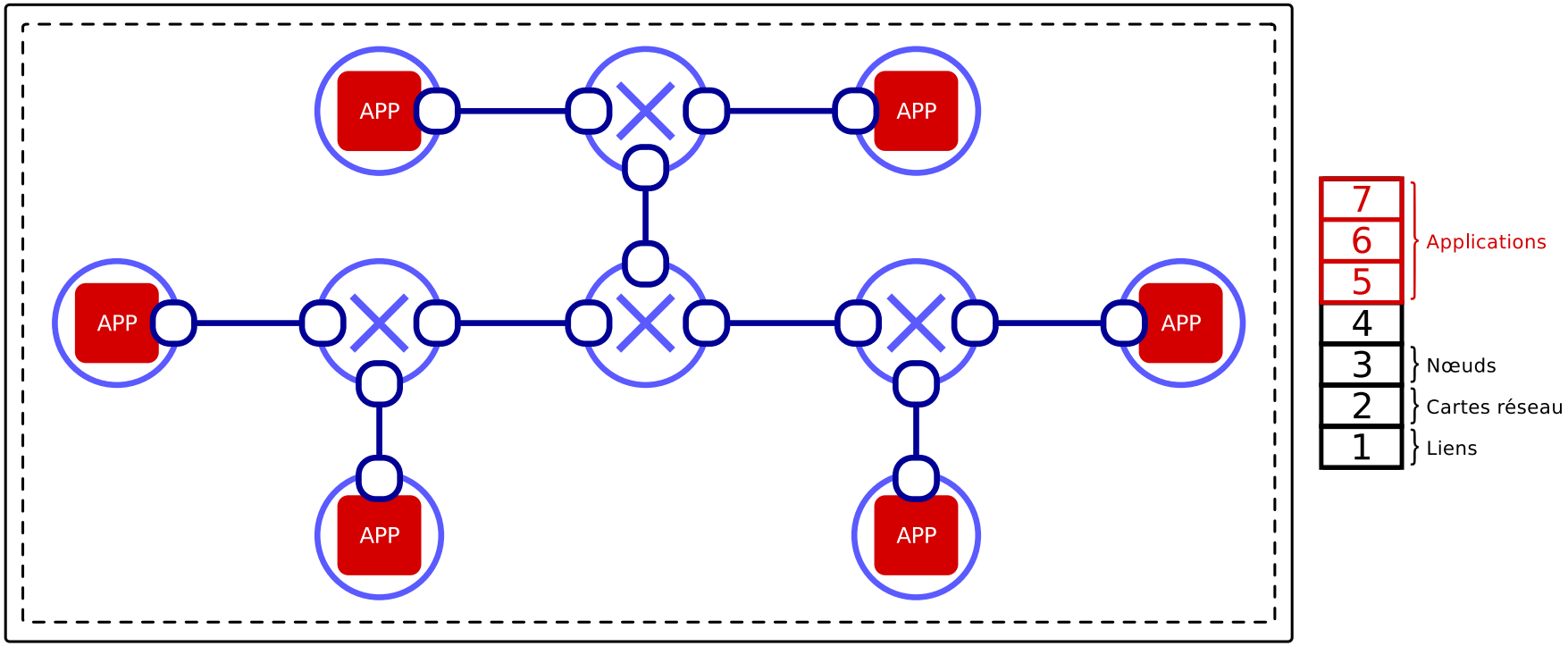
(e.g. carte Ethernet, carte wifi)

Hypothèses et pré-requis : Modèles IP



Nœuds finaux (e.g. poste de bureau, smartphone)
ou **de transit** (e.g. commutateur, routeur)

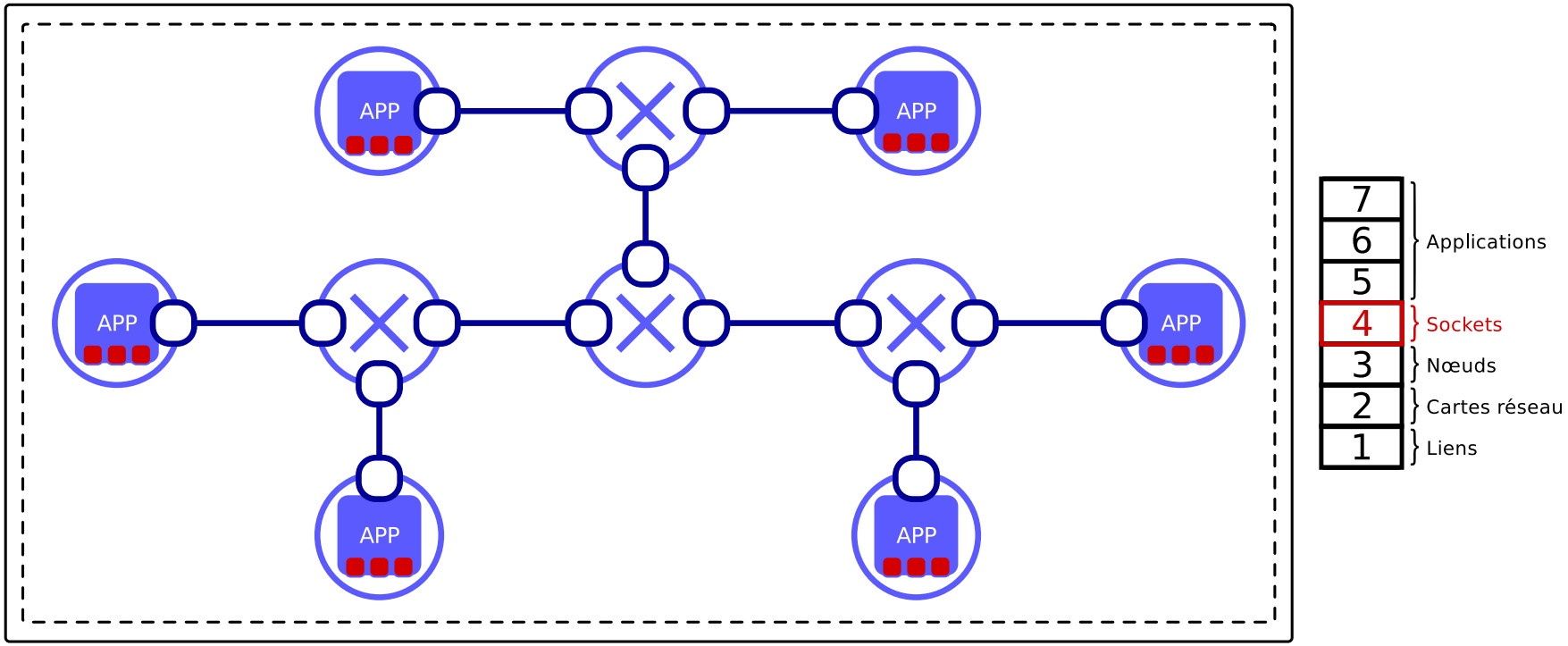
Hypothèses et pré-requis : Modèles IP



Applications

(e.g. client VoIP, serveur web)

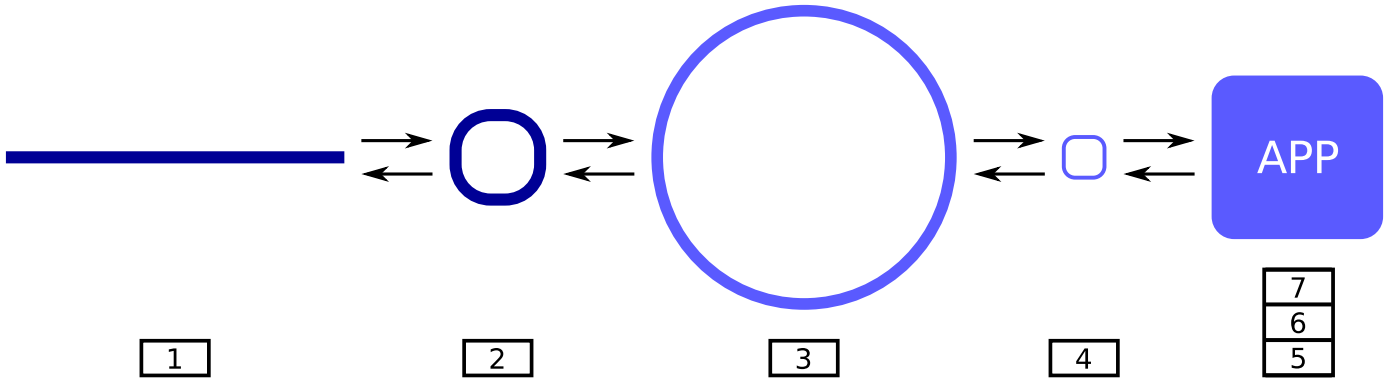
Hypothèses et pré-requis : Modèles IP



Sockets de transport

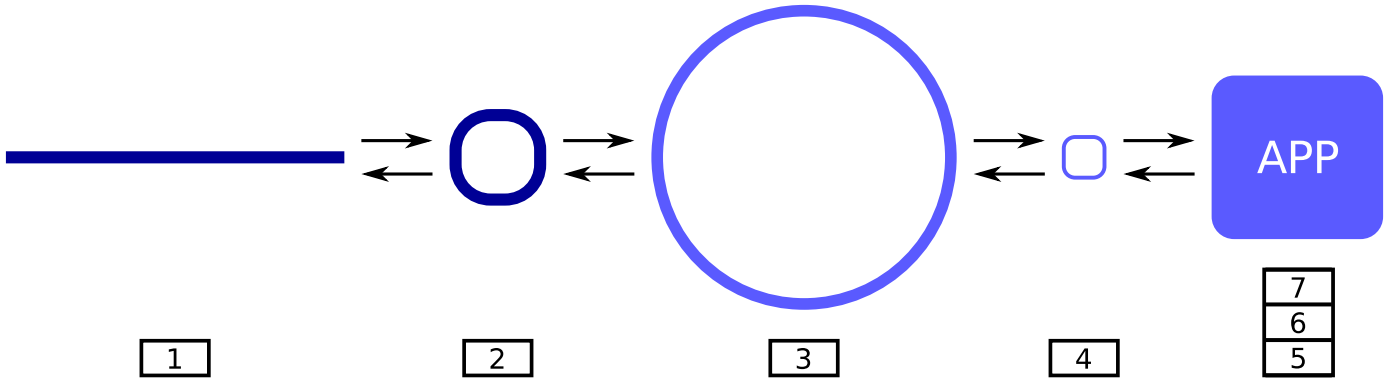
(e.g. TCP, UDP)

Hypothèses et pré-requis : Modèles IP



Les données de simulation passent **d'un sous-modèle à l'autre**, dans l'**ordre déterminé** par le standard OSI

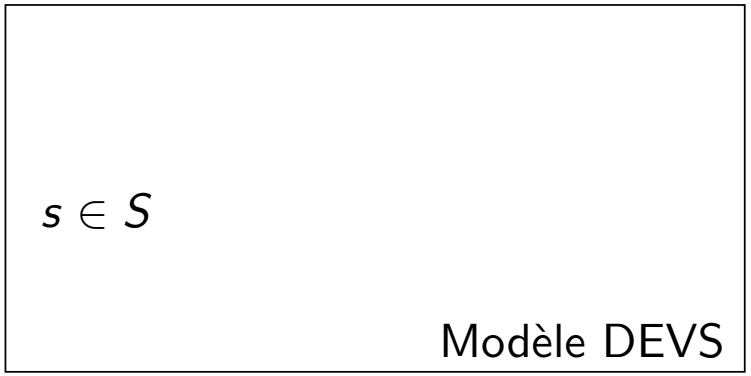
Hypothèses et pré-requis : Modèles IP



Les données de simulation passent **d'un sous-modèle à l'autre**, dans l'**ordre déterminé** par le standard OSI

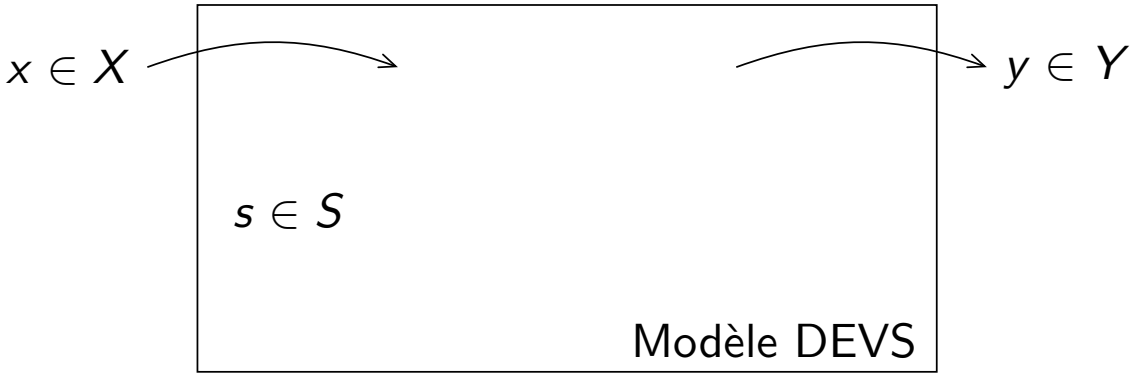
1 changement de couche = 1 événement interne

Hypothèses et pré-requis : Modèles DEVS



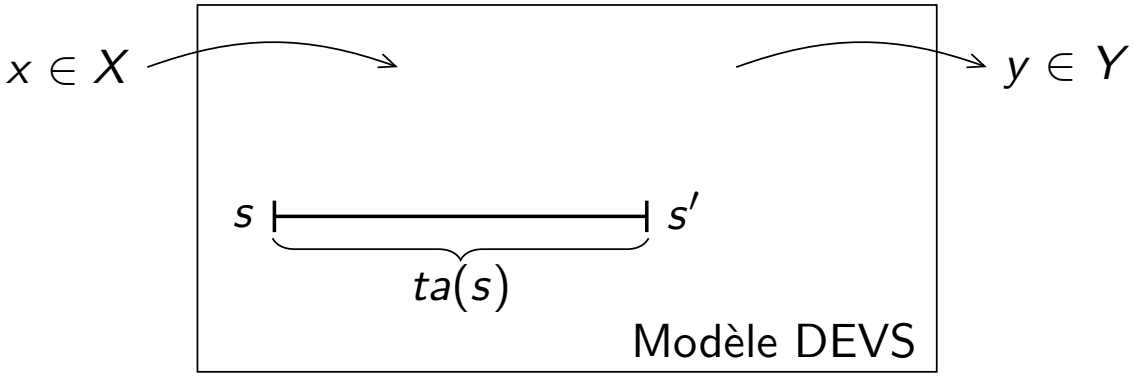
- **Événements internes :** exécutés pour faire évoluer l'état s

Hypothèses et pré-requis : Modèles DEVS



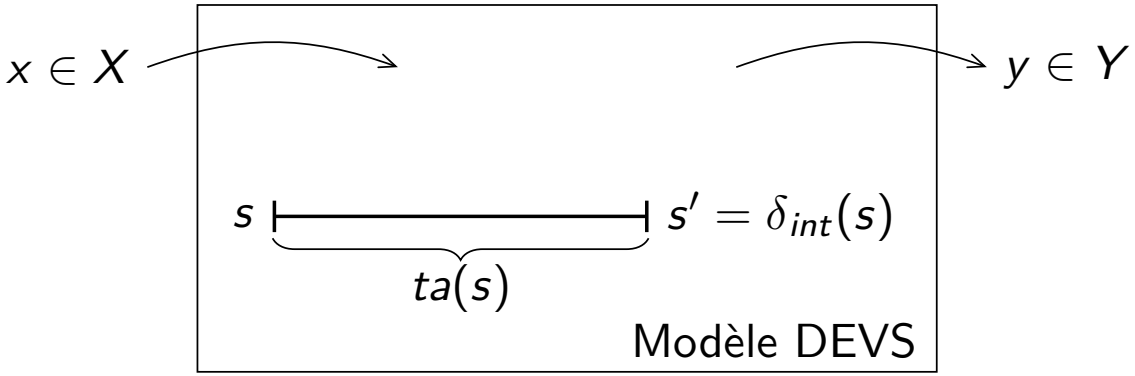
- **Événements internes :** exécutés pour faire évoluer l'état s
- **Événements externes :**
  - **Entrants :** transmis par d'autres modèles, via des **ports entrants** (X) du modèle DEVS
  - **Sortants :** à transmettre à d'autres modèles, via des **ports sortants** (Y) du modèle DEVS

Hypothèses et pré-requis : Modèles DEVS



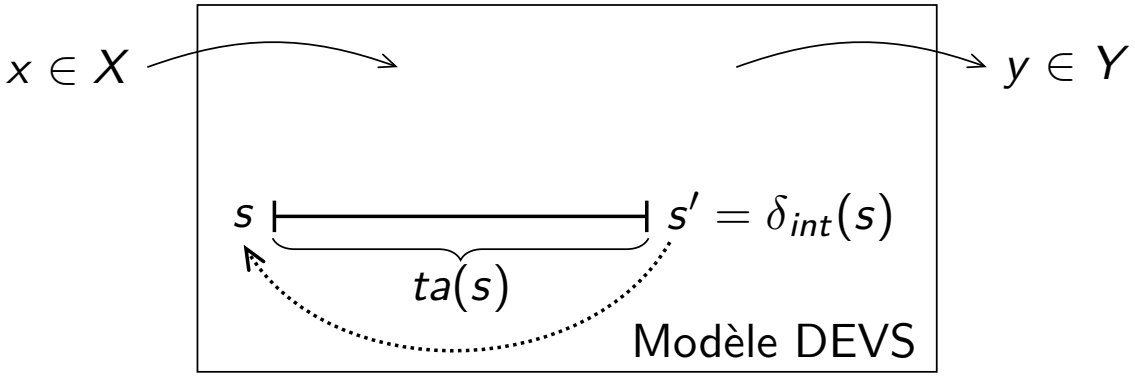
- $ta(s)$: fonction d'**avancement du temps**

Hypothèses et pré-requis : Modèles DEVS



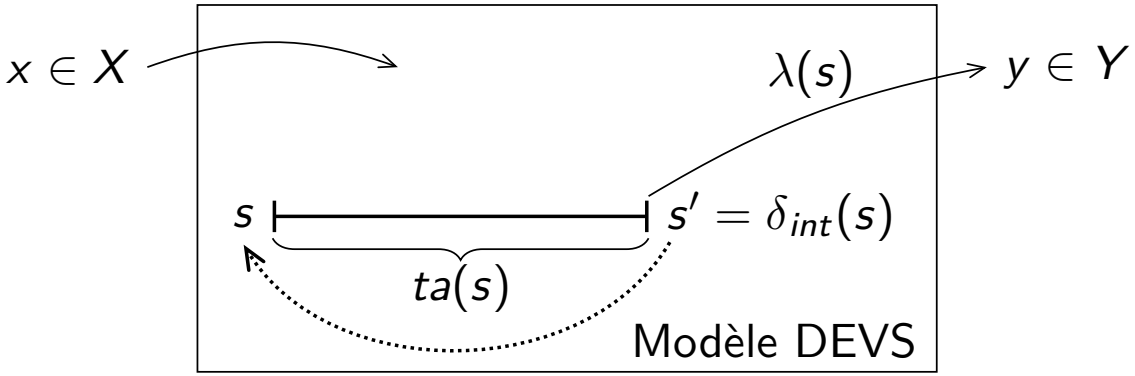
- $ta(s)$: fonction d'**avancement du temps**
- $\delta_{int}(s)$: fonction de **transition interne**

Hypothèses et pré-requis : Modèles DEVS



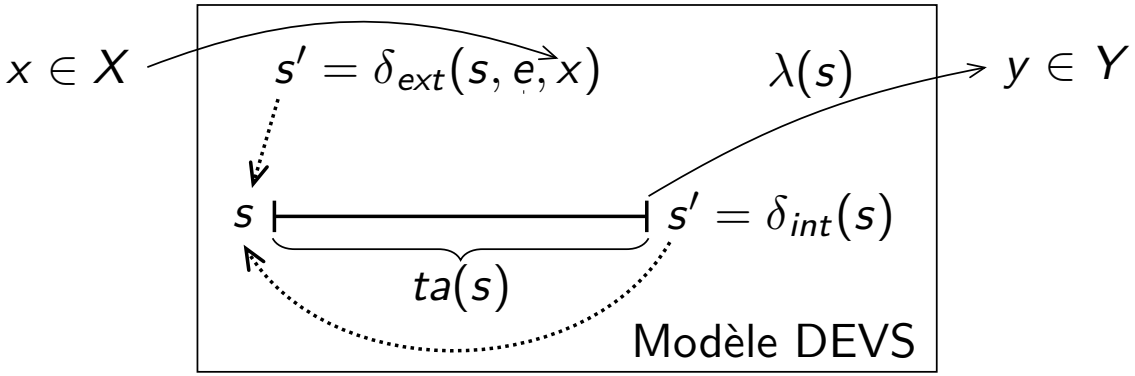
- $ta(s)$: fonction d'**avancement du temps**
- $\delta_{int}(s)$: fonction de **transition interne**

Hypothèses et pré-requis : Modèles DEVS



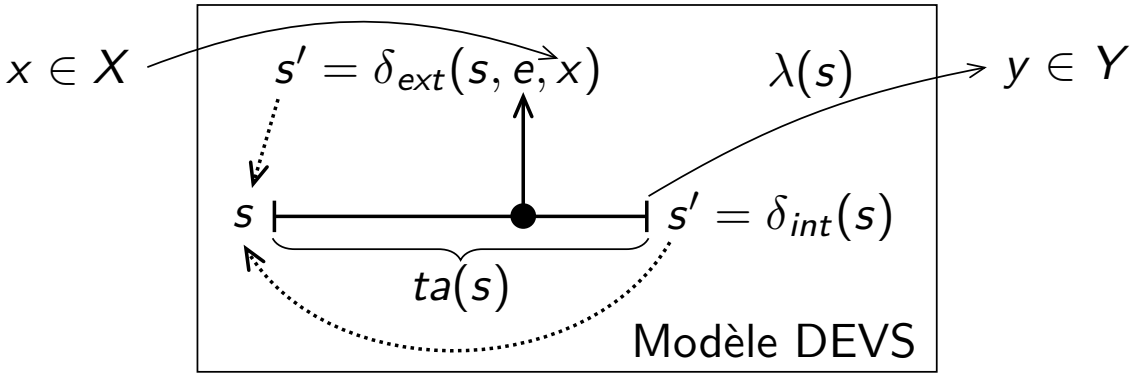
- $ta(s)$: fonction d'**avancement du temps**
- $\delta_{int}(s)$: fonction de **transition interne**
- $\lambda(s)$: fonction **de sortie**

Hypothèses et pré-requis : Modèles DEVS



- $ta(s)$: fonction d'**avancement du temps**
- $\delta_{int}(s)$: fonction de **transition interne**
- $\lambda(s)$: fonction **de sortie**
- $\delta_{ext}(s, e, x)$: fonction de **transition externe**

Hypothèses et pré-requis : Modèles DEVS



- $ta(s)$: fonction d'**avancement du temps**
- $\delta_{int}(s)$: fonction de **transition interne**
- $\lambda(s)$: fonction **de sortie**
- $\delta_{ext}(s, e, x)$: fonction de **transition externe**

Hypothèses et pré-requis : Wrapping de IP en DEVS

Intégrer un modèle IP à un multi-modèle DEVS implique de :

1. Définir les **concepts DEVS manquants** pour les modèles IP (événements externes et ports)

Hypothèses et pré-requis : Wrapping de IP en DEVS

Intégrer un modèle IP à un multi-modèle DEVS implique de :

1. Définir les **concepts DEVS manquants** pour les modèles IP (événements externes et ports)
2. Définir ou trouver un équivalent aux **4 fonctions DEVS pour un modèle IP**

Hypothèses et pré-requis : Wrapping de IP en DEVS

Intégrer un modèle IP à un multi-modèle DEVS implique de :

1. Définir les **concepts DEVS manquants** pour les modèles IP (événements externes et ports)
2. Définir ou trouver un équivalent aux **4 fonctions DEVS pour un modèle IP**
3. **Modifier la dynamique du simulateur IP**, pour qu'il soit capable de déclencher ces 4 fonctions (*protocole de simulation DEVS*)

Hypothèses et pré-requis : Wrapping de IP en DEVS

Intégrer un modèle IP à un multi-modèle DEVS implique de :

1. Définir les **concepts DEVS manquants** pour les modèles IP (événements externes et ports)
2. Définir ou trouver un équivalent aux **4 fonctions DEVS pour un modèle IP**
3. **Modifier la dynamique du simulateur IP**, pour qu'il soit capable de déclencher ces 4 fonctions (*protocole de simulation DEVS*)

Comment appliquer cette démarche, en prenant en considération les 2 différents modes d'intégration ?

Hypothèses et pré-requis : Autres

Autres hypothèses :

- Modèles IP conformes aux **standards Internet** (RFC)
- Trames et paquets représentés **de façon atomique**

Hypothèses et pré-requis : Autres

Autres hypothèses :

- Modèles IP conformes aux **standards Internet** (RFC)
- Trames et paquets représentés **de façon atomique**

Contraintes :

- Modèles et simulateurs **interchangeables** : pas de solution *ad-hoc*
- **Version d'origine** des simulateurs : gestion aisée des mises à jour

Sommaire

Introduction
Problématiques
Hypothèses et pré-requis
Propositions
- Stratégie de wrapping
- Ouvrir les modèles (structurel)
- Ouvrir les modèles (spatial)
- Ouvrir les simulateurs
- Bilan

Validation expérimentale
Cas d'utilisation
- Smart Heating
- Concept Grid

Conclusion
Perspectives

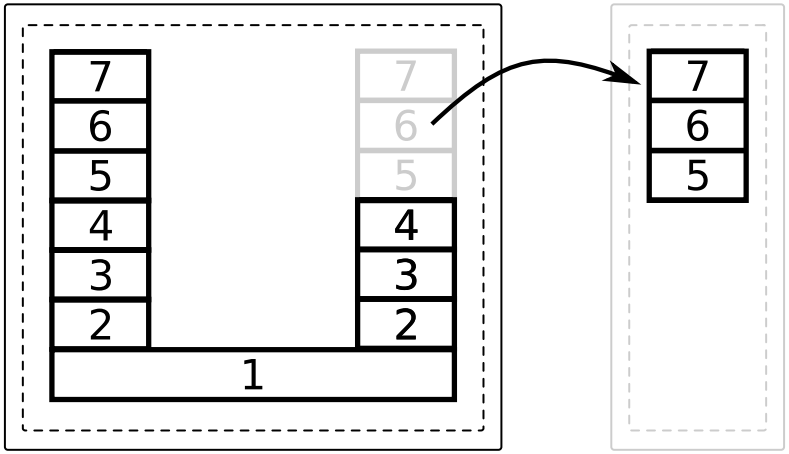
Sommaire

Introduction
Problématiques
Hypothèses et pré-requis
Propositions
- Stratégie de wrapping
- Ouvrir les modèles (structurel)
- Ouvrir les modèles (spatial)
- Ouvrir les simulateurs
- Bilan

Validation expérimentale
Cas d'utilisation
- Smart Heating
- Concept Grid

Conclusion
Perspectives

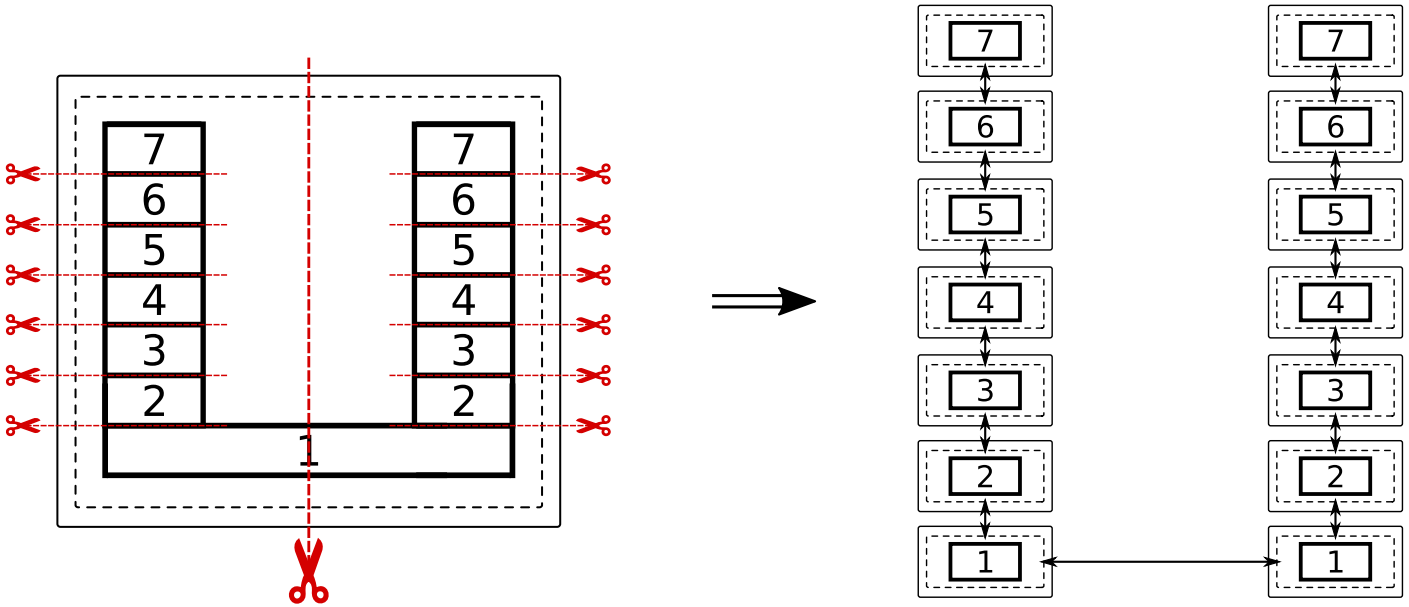
Stratégie de wrapping : Coupure des modèles IP



Coupler un modèle = Déléguer la représentation d'une partie du système cible

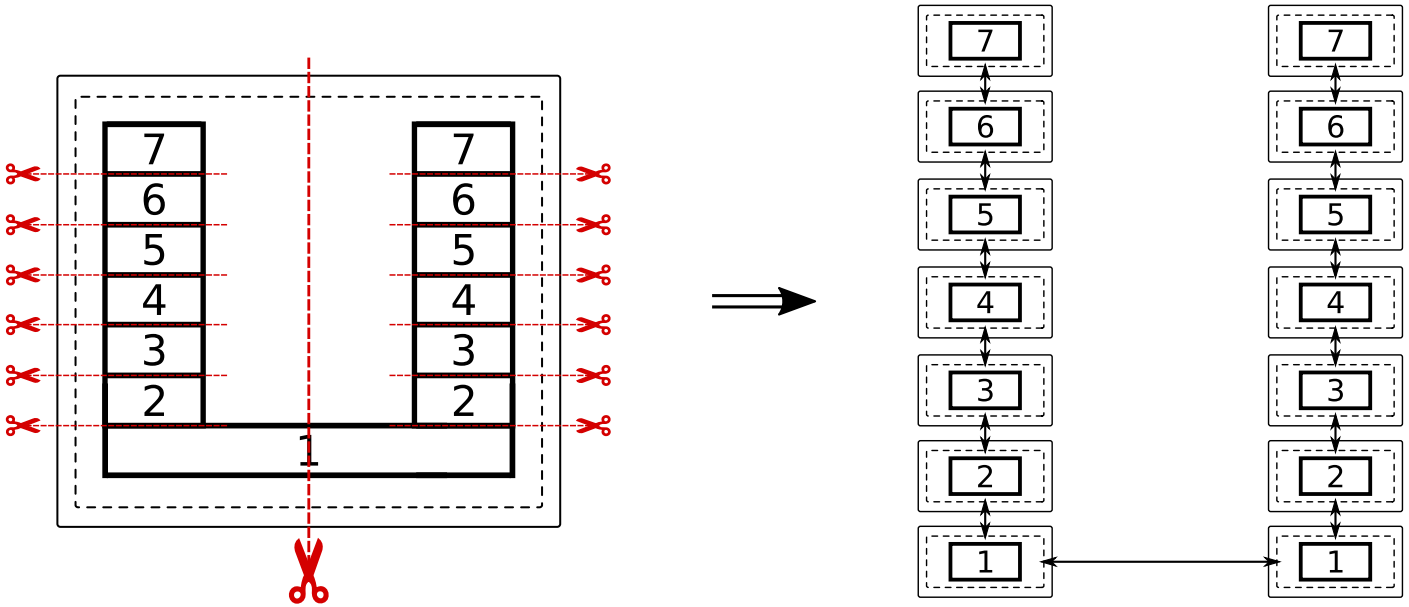
Stratégie de wrapping : Coupure des modèles IP

Cas extrême :



Stratégie de wrapping : Coupure des modèles IP

Cas extrême :



Quelles sont les coupures qui sont ***réalisables et utiles****,*
pour ***quel mode de couplage*** *?*

Stratégie de wrapping : Contraintes pour les coupures

Trois niveaux de contraintes sont à prendre en considération :

1. **Modélisation :** les modèles individuels doivent respecter les standards OSI & Internet

Stratégie de wrapping : Contraintes pour les coupures

Trois niveaux de contraintes sont à prendre en considération :

1. **Modélisation :** les modèles individuels doivent respecter les standards OSI & Internet

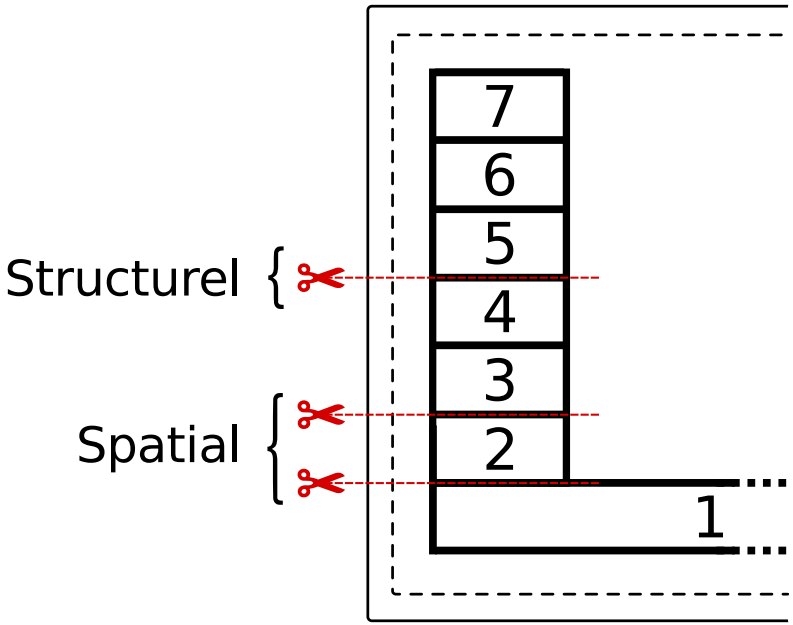
2. **Simulation :** les modèles individuels doivent rester cohérents et exécutables par leur simulateur

Stratégie de wrapping : Contraintes pour les coupures

Trois niveaux de contraintes sont à prendre en considération :

1. **Modélisation :** les modèles individuels doivent respecter les standards OSI & Internet
2. **Simulation :** les modèles individuels doivent rester cohérents et exécutables par leur simulateur
3. **Logiciel :** les concepts proposés pour relier les modèles doivent pouvoir être implémentés avec ce qui est proposé par le simulateur

Stratégie de wrapping : Contraintes pour les coupures



Réduction à **3 types de coupures** utiles et réalisables

Stratégie de wrapping : Proposition

1. **Ouvrir le modèle IP** (selon le mode d'intégration) :

Stratégie de wrapping : Proposition

1. **Ouvrir le modèle IP** (selon le mode d'intégration) :

   1.1 Définir la **notion d'événement externe**

Stratégie de wrapping : Proposition

1. **Ouvrir le modèle IP** (selon le mode d'intégration) :

   1.1 Définir la **notion d'événement externe**

   1.2 Définir la **notion de port entrant/sortant**

Stratégie de wrapping : Proposition

1. **Ouvrir le modèle IP** (selon le mode d'intégration) :

   1.1 Définir la **notion d'événement externe**

   1.2 Définir la **notion de port entrant/sortant**

   1.3 Définir le comportement des **fonctions** λ **et** δ_{ext}

Stratégie de wrapping : Proposition

1. **Ouvrir le modèle IP** (selon le mode d'intégration) :

   1.1 Définir la **notion d'événement externe**

   1.2 Définir la **notion de port entrant/sortant**

   1.3 Définir le comportement des **fonctions** λ **et** δ_{ext}

2. **Ouvrir le simulateur IP** :

Stratégie de wrapping : Proposition

1. **Ouvrir le modèle IP** (selon le mode d'intégration) :

   1.1 Définir la **notion d'événement externe**

   1.2 Définir la **notion de port entrant/sortant**

   1.3 Définir le comportement des **fonctions** λ **et** δ_{ext}

2. **Ouvrir le simulateur IP** :

   2.1 Identifier les **fonctions équivalentes à** ta **et** δ_{int} dans les modèles

Stratégie de wrapping : Proposition

1. **Ouvrir le modèle IP** (selon le mode d'intégration) :

   1.1 Définir la **notion d'événement externe**

   1.2 Définir la **notion de port entrant/sortant**

   1.3 Définir le comportement des **fonctions** λ **et** δ_{ext}

2. **Ouvrir le simulateur IP** :

   2.1 Identifier les **fonctions équivalentes à** ta **et** δ_{int} dans les modèles

   2.2 Permettre de les **déclencher à la demande**

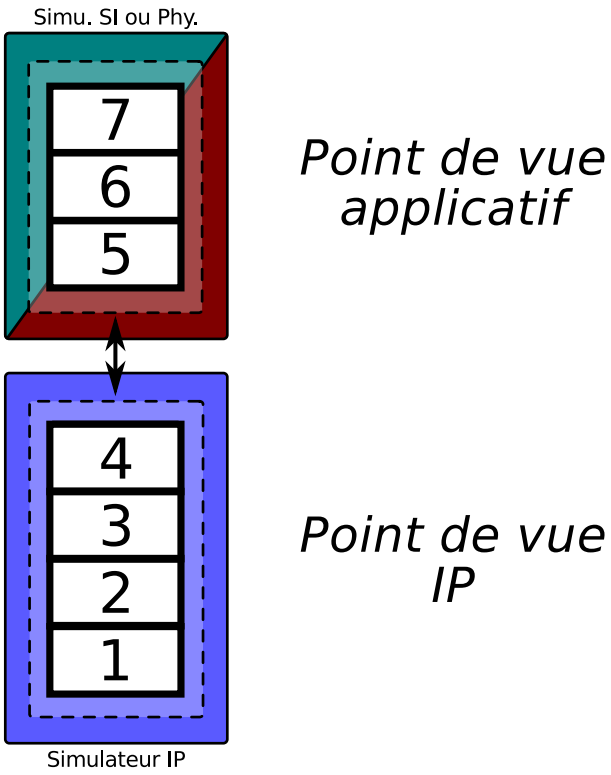
Sommaire

Introduction
Problématiques
Hypothèses et pré-requis
Propositions
- Stratégie de wrapping
- Ouvrir les modèles (structurel)
- Ouvrir les modèles (spatial)
- Ouvrir les simulateurs
- Bilan

Validation expérimentale
Cas d'utilisation
- Smart Heating
- Concept Grid

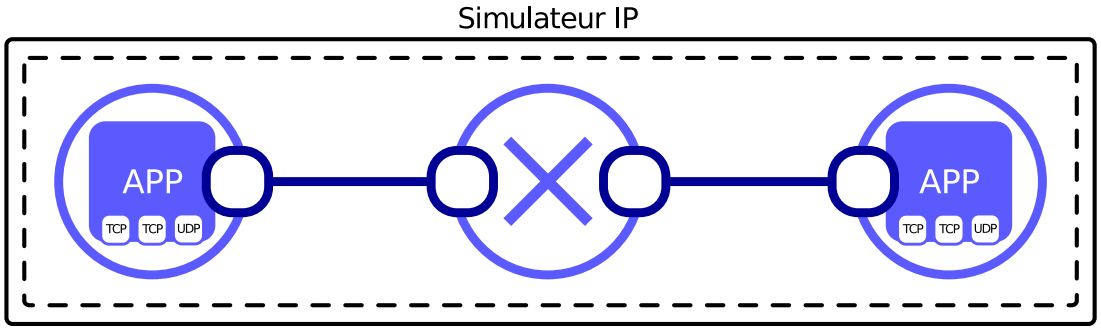
Conclusion
Perspectives

Mode structurel (1/3) : Notion d'événement externe



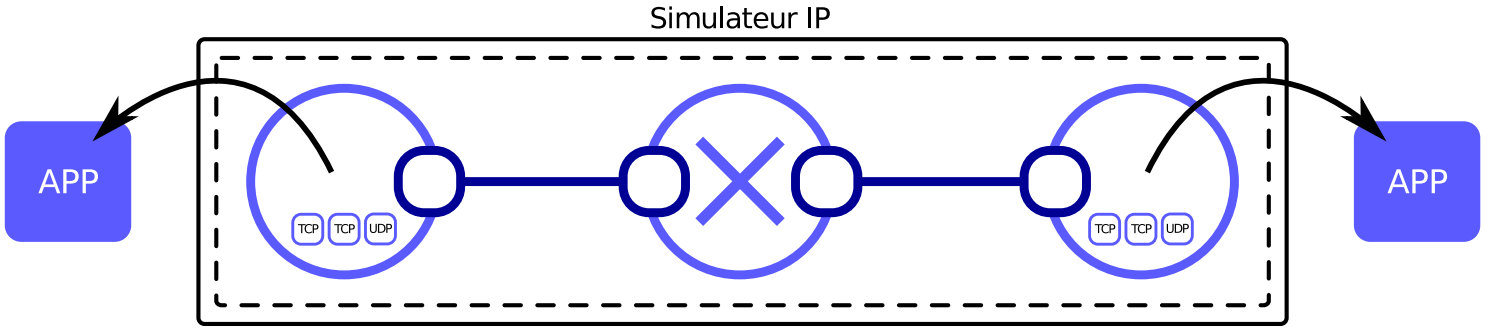
Utilisation d'un modèle tiers producteur/consommateur de **données applicatives**, échangées avec le modèle IP

Mode structurel (2/3) : Notion de port



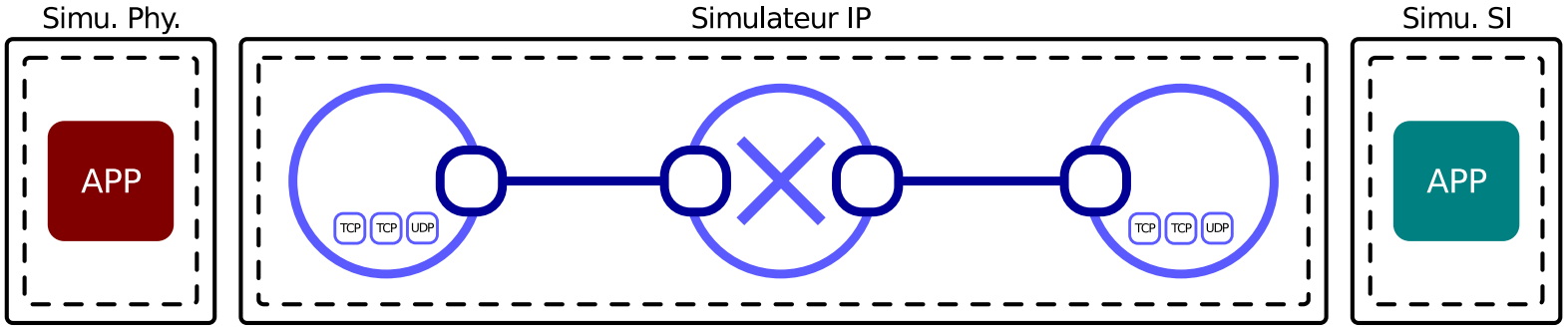
- **Externalisation** du sous-modèle d'application

Mode structurel (2/3) : Notion de port



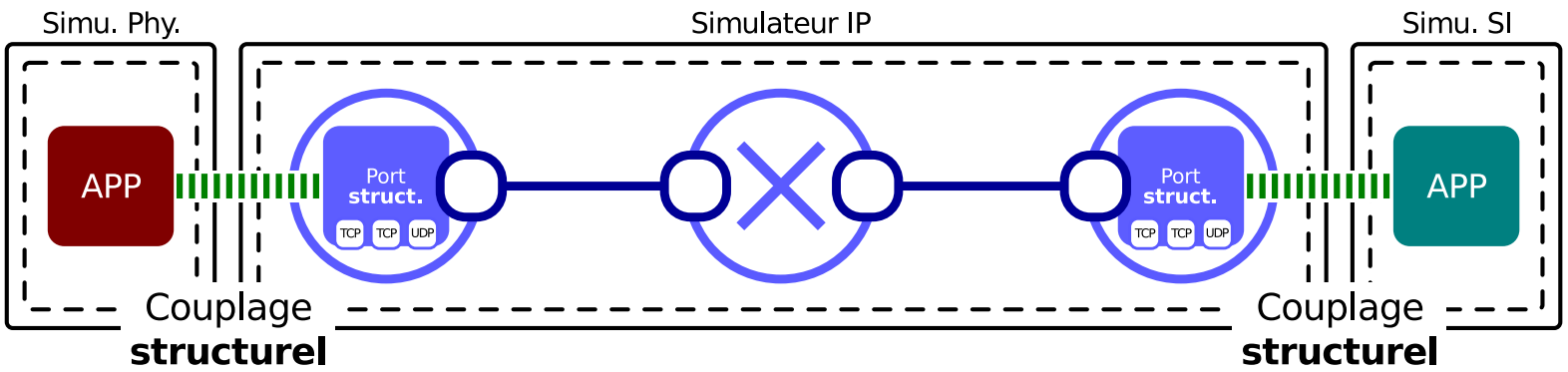
- **Externalisation** du sous-modèle d'application

Mode structurel (2/3) : Notion de port



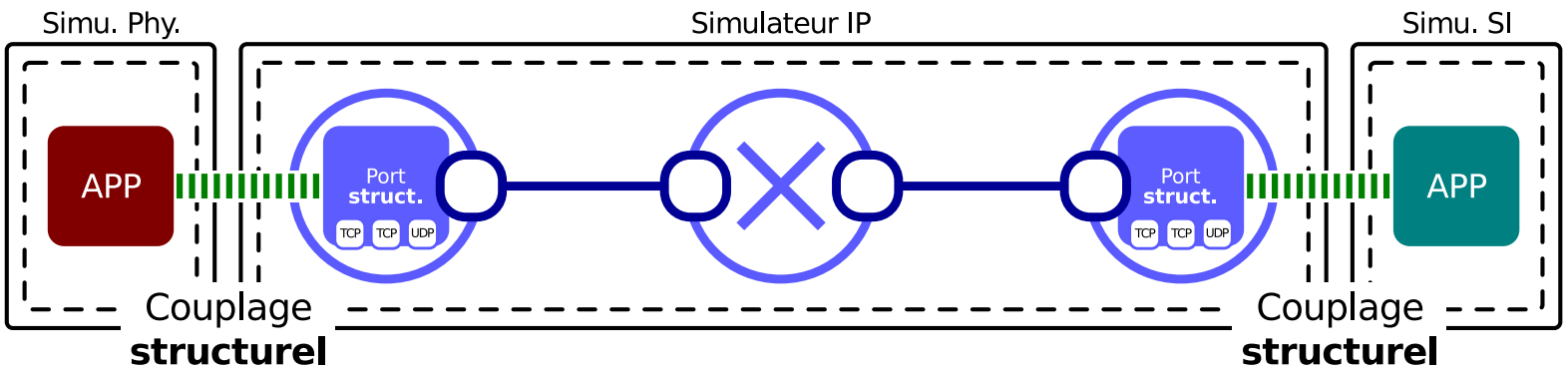
- **Externalisation** du sous-modèle d'application

Mode structurel (2/3) : Notion de port



- **Externalisation** du sous-modèle d'application
- Liaison avec les sockets avec un **sous-modèle d'application** (port structurel) qui contient un port DEVS

Mode structurel (2/3) : Notion de port



- **Externalisation** du sous-modèle d'application
- Liaison avec les sockets avec un **sous-modèle d'application** (port structurel) qui contient un port DEVS
  - **Port DEVS sortant :** application de type serveur
  - **Port DEVS entrant :** application de type client

Mode structurel (3/3) : Fonctions DEVS

Le sous-modèle d'application permet de **définir** λ **et** δ_{ext} :

- λ **côté serveur :** *Transforme les données applicatives transmises par les sous-modèles de socket, en événements externes sortants*

Mode structurel (3/3) : Fonctions DEVS

Le sous-modèle d'application permet de **définir** λ **et** δ_{ext} :

- λ **côté serveur :** *Transforme les données applicatives transmises par les sous-modèles de socket, en événements externes sortants*
- δ_{ext} **côté client :** *Transmet les données applicatives reçues par événements externes entrants, aux sous-modèles de sockets*

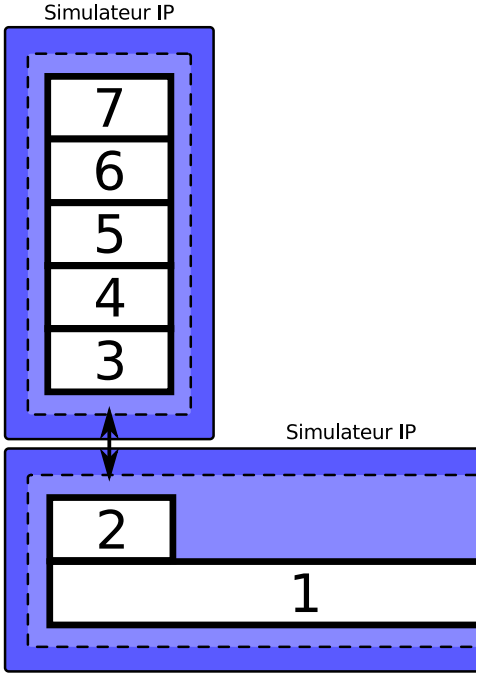
Sommaire

Introduction
Problématiques
Hypothèses et pré-requis
Propositions
- Stratégie de wrapping
- Ouvrir les modèles (structurel)
- Ouvrir les modèles (spatial)
- Ouvrir les simulateurs
- Bilan

Validation expérimentale
Cas d'utilisation
- Smart Heating
- Concept Grid

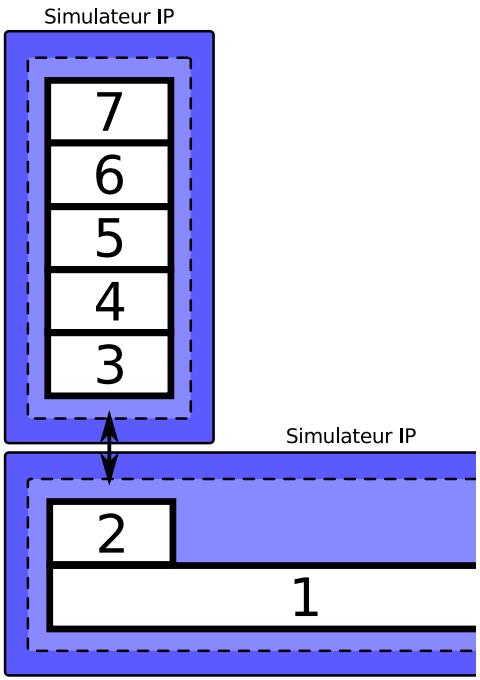
Conclusion
Perspectives

Mode spatial (1/3) : Notion d'événement externe

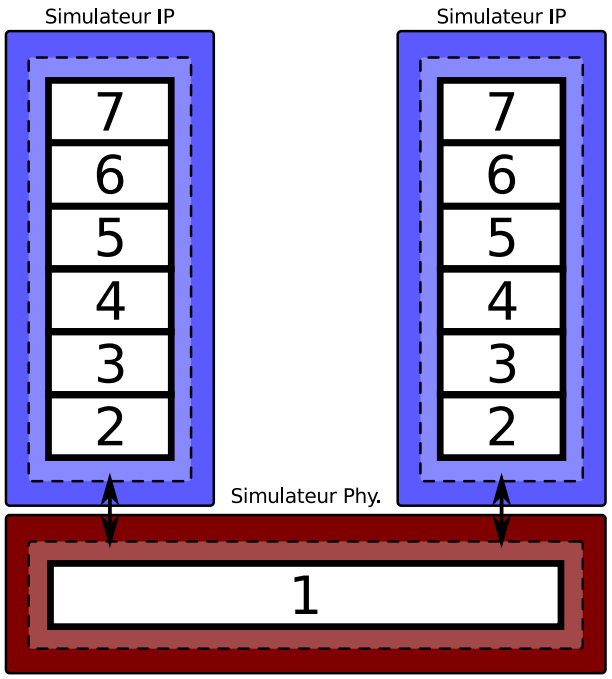


Niveau 3 : coupure entre un nœud et l'un de ses réseaux (échange de **paquets simulés**)

Mode spatial (1/3) : Notion d'événement externe

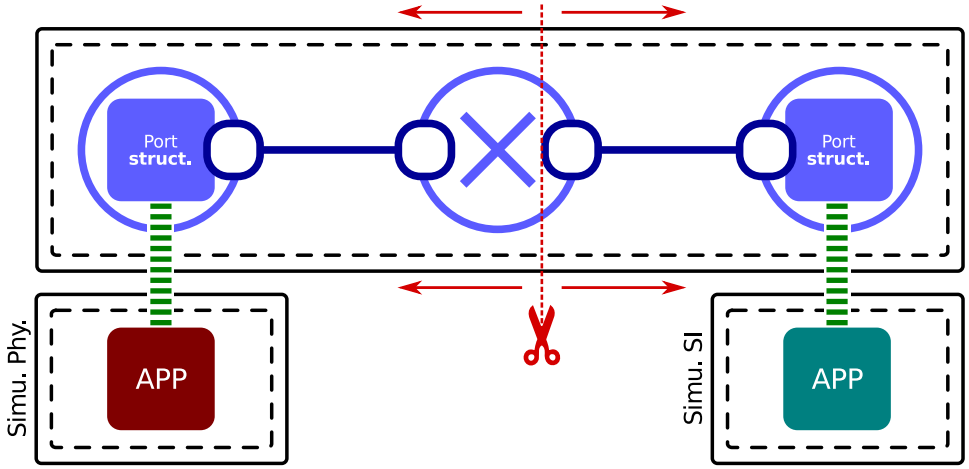


Niveau 3 : coupure entre un nœud et l'un de ses réseaux (échange de **paquets simulés**)



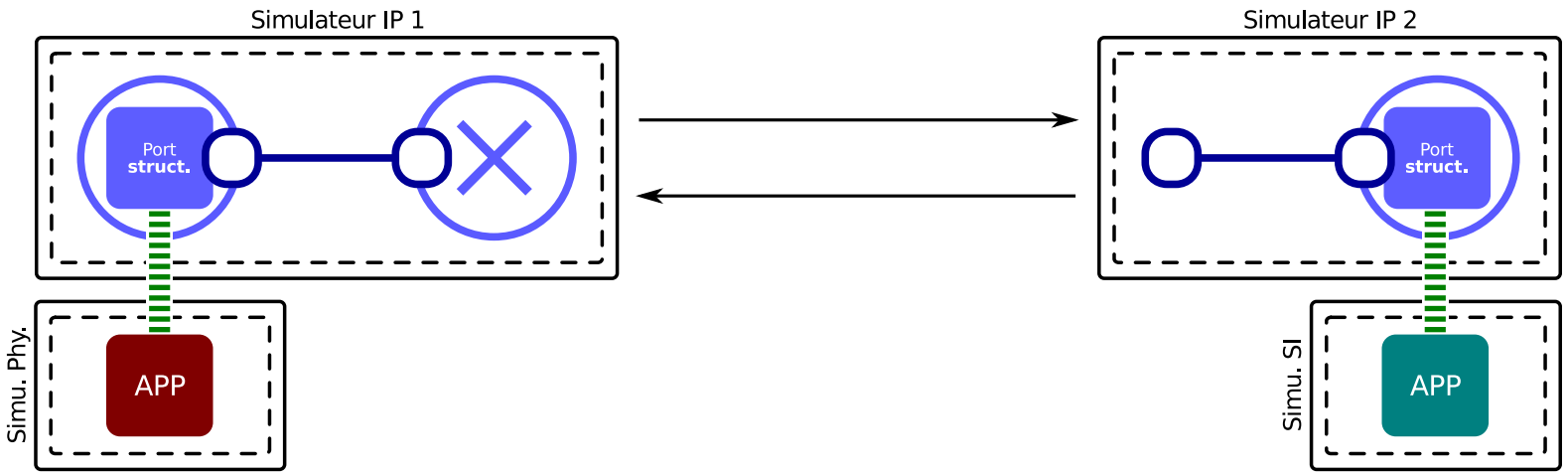
Niveau 2 : modélisation d'un lien à l'aide d'un simulateur physique (échange de **trames simulées**)

Mode spatial : Éclatement de la topologie



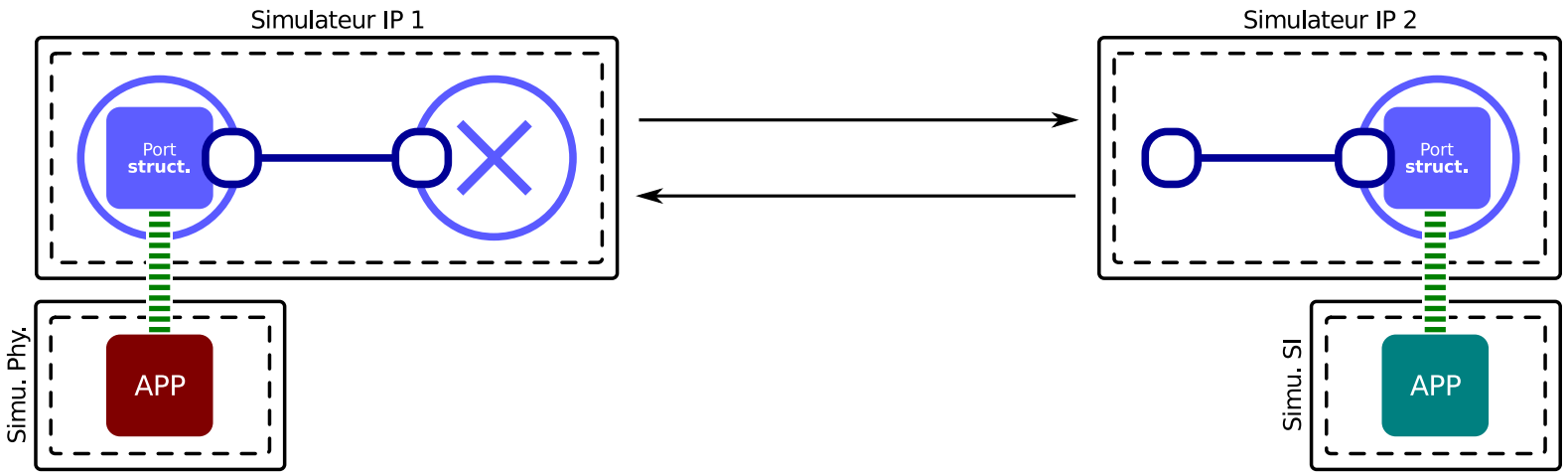
- On coupe en fonction de la **topologie IP à modéliser**

Mode spatial : Éclatement de la topologie



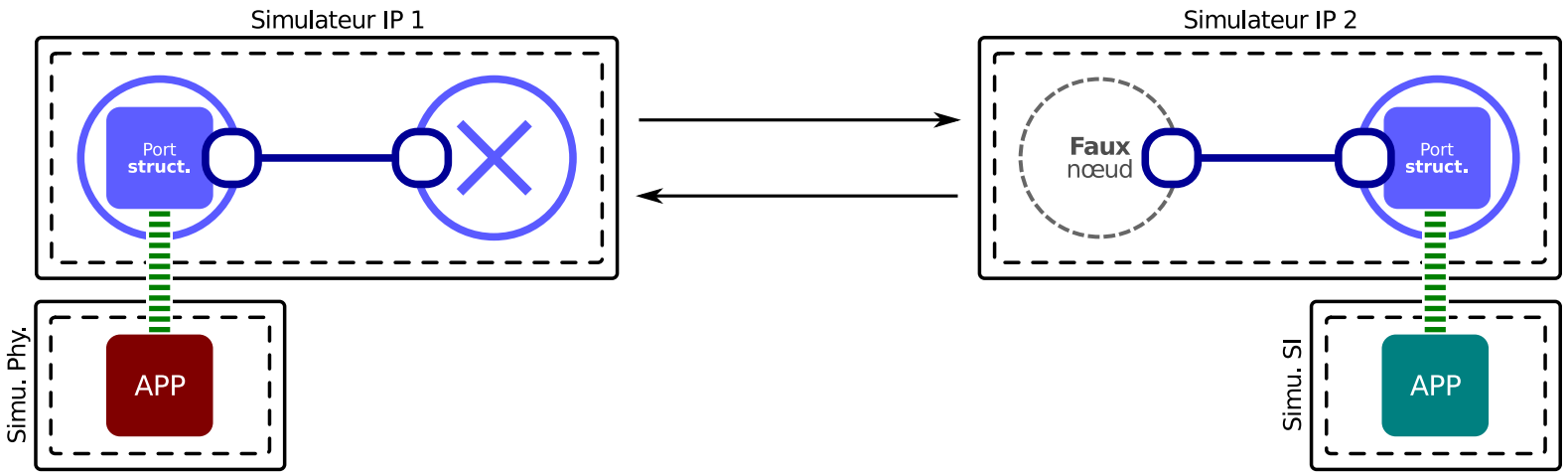
- On coupe en fonction de la **topologie IP à modéliser**
- Les 2 modèles doivent **respecter les 3 niveaux de contrainte**

Mode spatial : Éclatement de la topologie



- On coupe en fonction de la **topologie IP à modéliser**
- Les 2 modèles doivent **respecter les 3 niveaux de contrainte**
- Couper une topologie IP en deux $\not\Longrightarrow$ **2 topologies IP**

Mode spatial : Éclatement de la topologie

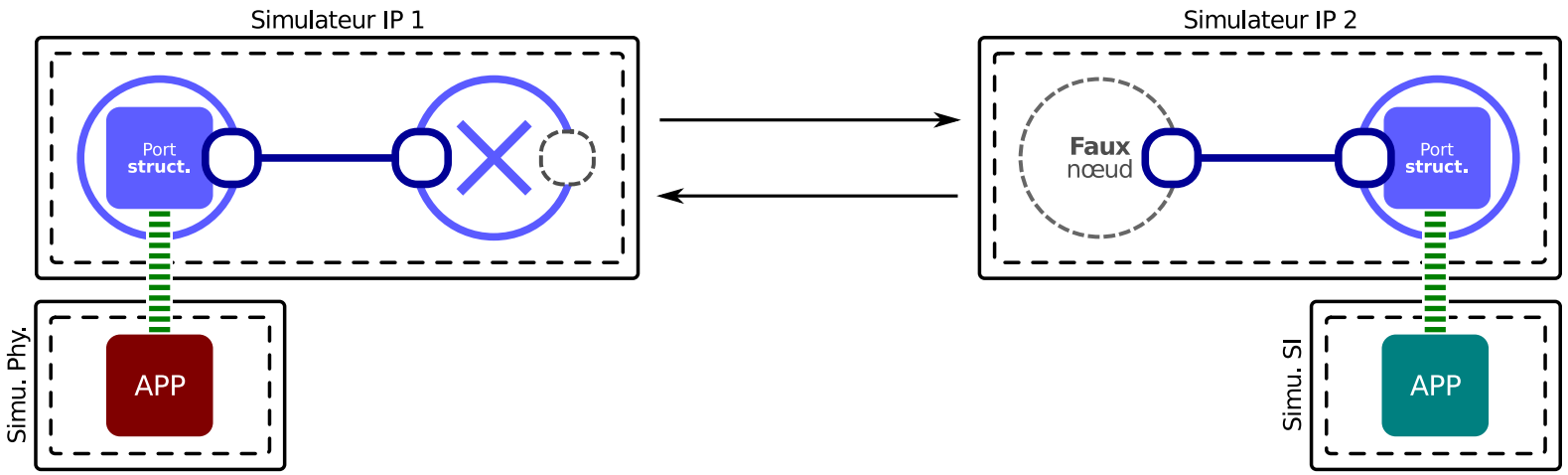


Exemple de contrainte de simulation :

Une carte réseau doit être attachée à un nœud

$\Longrightarrow$ Ajout d'un appendice (*faux nœud*)

Mode spatial : Éclatement de la topologie

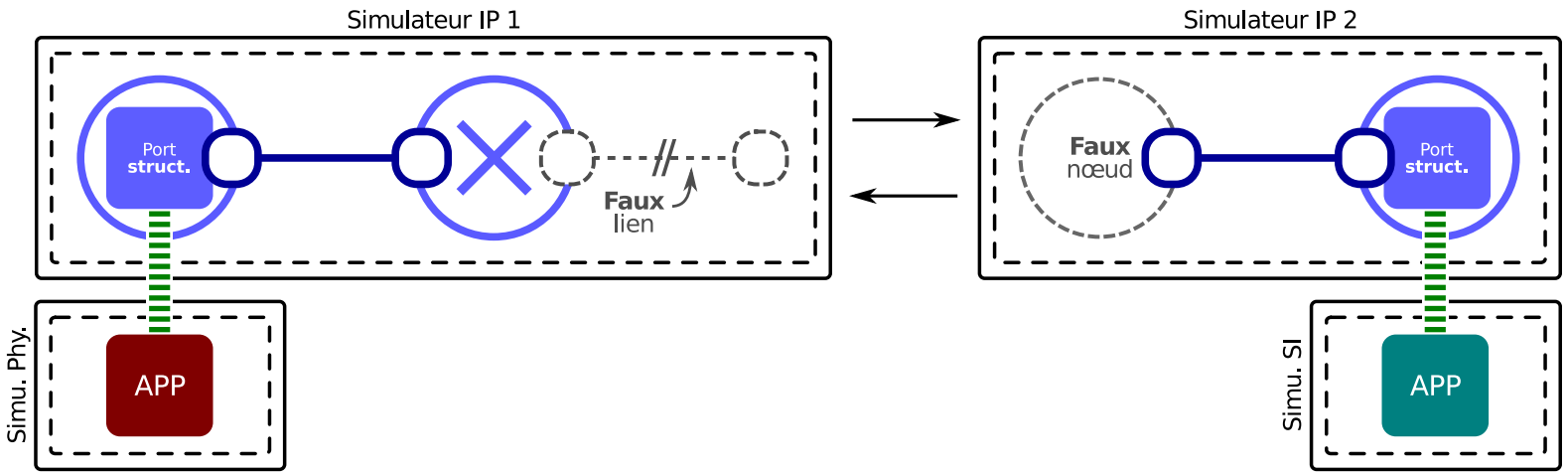


Exemple de contrainte de modélisation :

Un nœud de transit doit avoir accès à toutes ses cartes réseau pour exécuter ses algorithmes

$\Longrightarrow$ Ajout d'un appendice (*fausse carte réseau*)

Mode spatial : Éclatement de la topologie

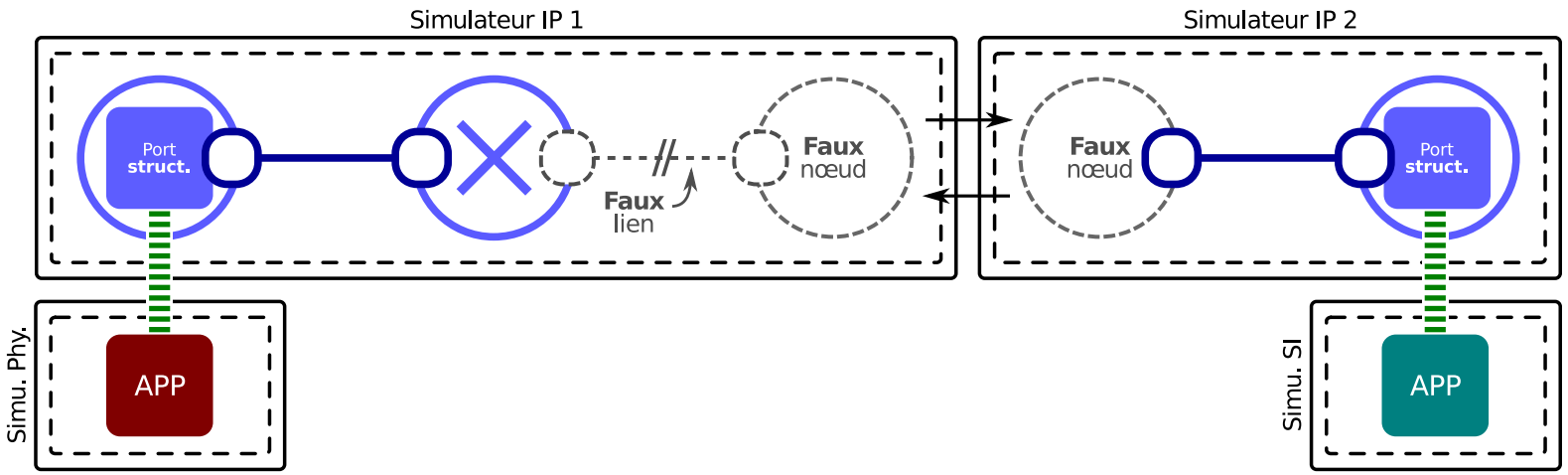


Exemple de contrainte de simulation :

Une carte réseau doit être attachée à un lien
(et un lien à une carte à chaque extrémité)

$\Longrightarrow$ Ajout d'un appendice (*faux lien*)

Mode spatial : Éclatement de la topologie



Exemple de contrainte de simulation :

Une carte réseau doit être attachée à un nœud

$\Longrightarrow$ Ajout d'un appendice (*faux nœud*)

Mode spatial : Éclatement de la topologie

Les appendices sont des (combinaisons de) sous-modèles permettant de compléter les réseaux, tout en :

1. N'ayant **aucun impact sur les données** qu'ils recoivent

Mode spatial : Éclatement de la topologie

Les appendices sont des (combinaisons de) sous-modèles permettant de compléter les réseaux, tout en :

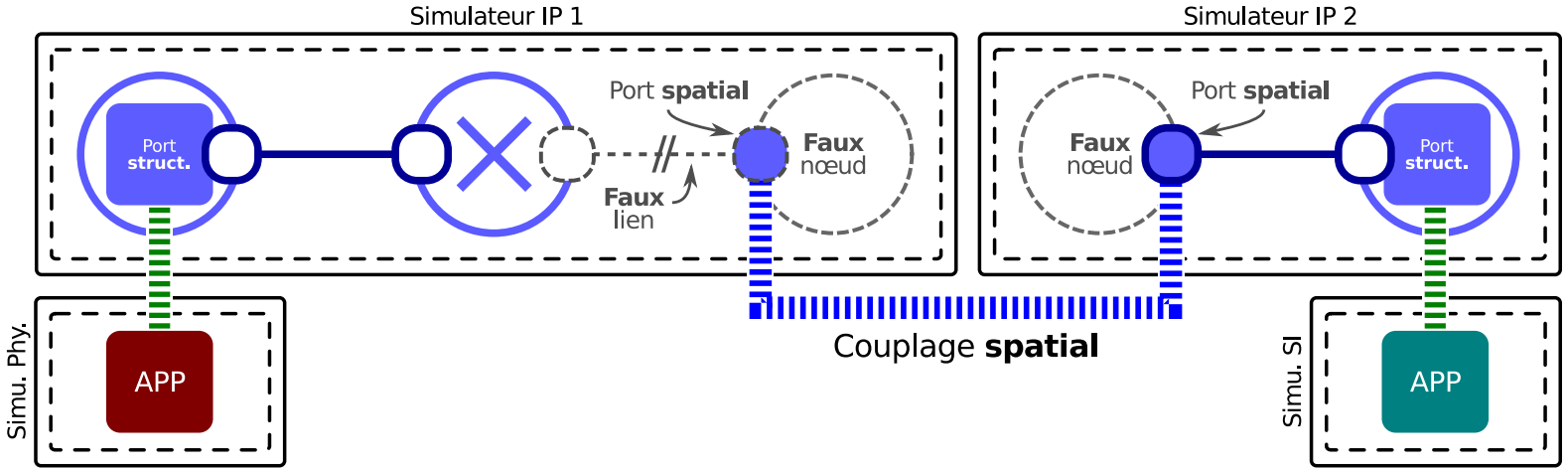
1. N'ayant **aucun impact sur les données** qu'ils recoivent
2. N'ayant **aucun rôle dans le réseau**, n'étant pas censés exister

Mode spatial : Éclatement de la topologie

Les appendices sont des (combinaisons de) sous-modèles permettant de compléter les réseaux, tout en :

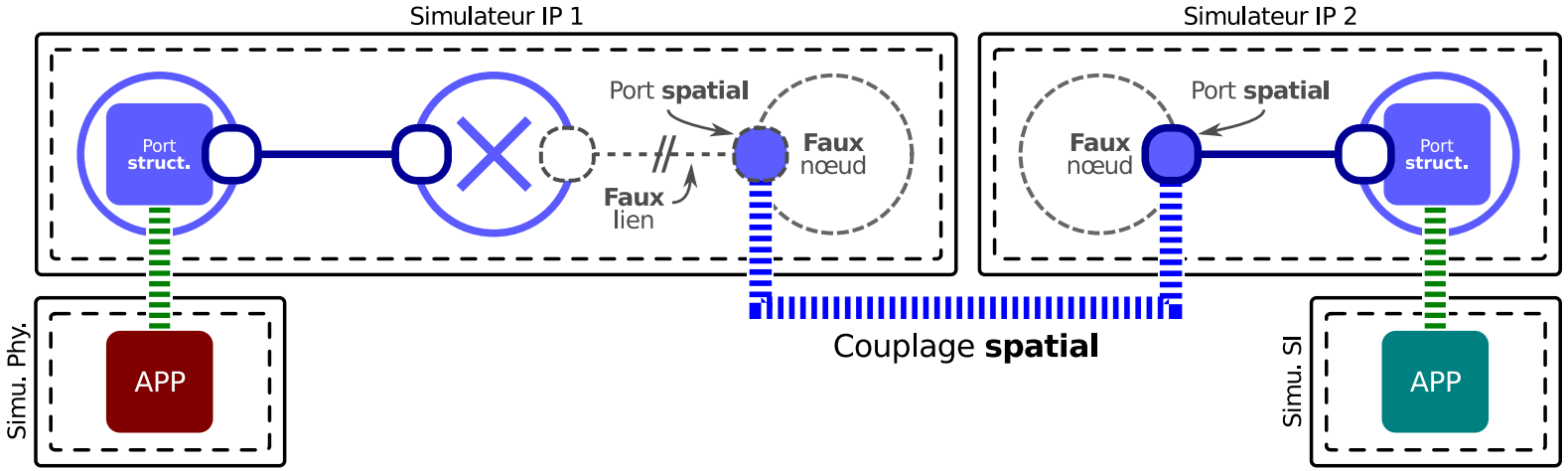
1. N'ayant **aucun impact sur les données** qu'ils recoivent
2. N'ayant **aucun rôle dans le réseau**, n'étant pas censés exister
3. N'étant **à l'origine d'aucun événement** de simulation qui « consommerait » du temps de simulation (e.g. liens parfaits)

Mode spatial (2/3) : Notion de port



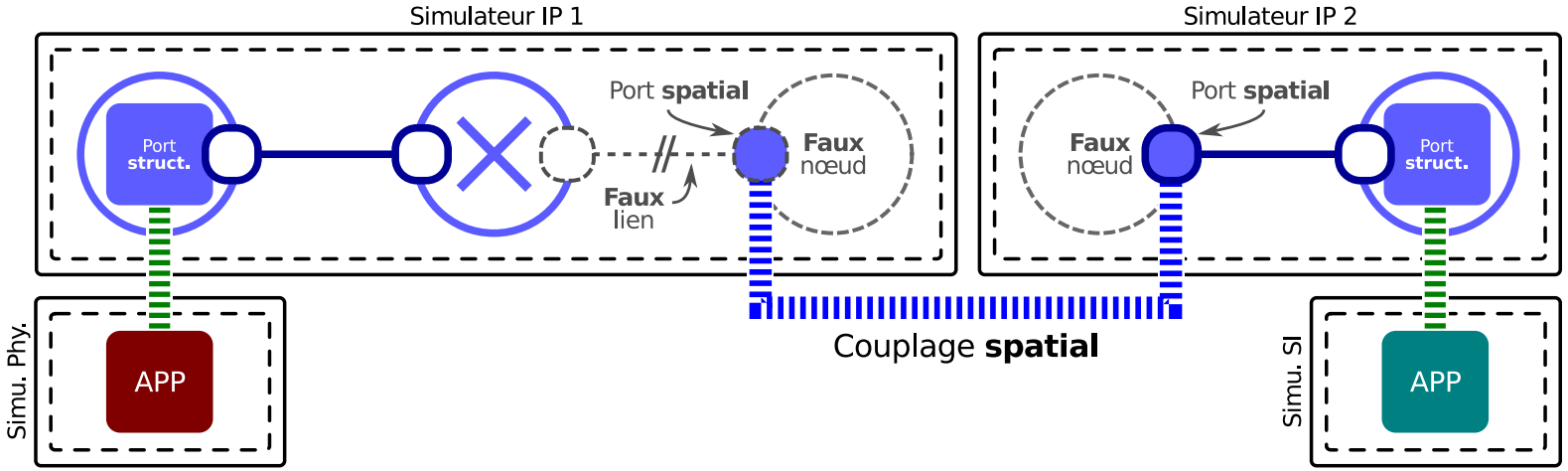
- Utilisation d'un **sous-modèle de carte réseau** (port spatial), pour avoir accès aux couches 1, 2 et 3

Mode spatial (2/3) : Notion de port



- Utilisation d'un **sous-modèle de carte réseau** (port spatial), pour avoir accès aux couches 1, 2 et 3
- Il matérialise la **passerelle entre les deux sections**

Mode spatial (2/3) : Notion de port



- Utilisation d'un **sous-modèle de carte réseau** (port spatial), pour avoir accès aux couches 1, 2 et 3
- Il matérialise la **passerelle entre les deux sections**
- 1 port spatial contient 2 ports DEVS : **entrant et sortant**

Mode spatial (3/3) : Fonctions DEVS

Le sous-modèle de port spatial permet de **définir** λ **et** δ_{ext} :

- λ **sens sortant :**

Mode spatial (3/3) : Fonctions DEVS

Le sous-modèle de port spatial permet de **définir** λ **et** δ_{ext} :

- λ **sens sortant :**

  1. *Transforme les trames/paquets reçus par le réseau, en événements externes*

Mode spatial (3/3) : Fonctions DEVS

Le sous-modèle de port spatial permet de **définir** λ **et** δ_{ext} :

- λ **sens sortant :**

  1. *Transforme les trames/paquets reçus par le réseau, en événements externes*

  2. *Empêche leur ascension dans les couches supérieures*

Mode spatial (3/3) : Fonctions DEVS

Le sous-modèle de port spatial permet de **définir** λ **et** δ_{ext} :

- λ **sens sortant :**
  1. *Transforme les trames/paquets reçus par le réseau, en événements externes*
  2. *Empêche leur ascension dans les couches supérieures*
- δ_{ext} **sens entrant :** *Injecte les trames/paquets reçus par événements externes, en les transmettant à la couche 1 ou 2*

Sommaire

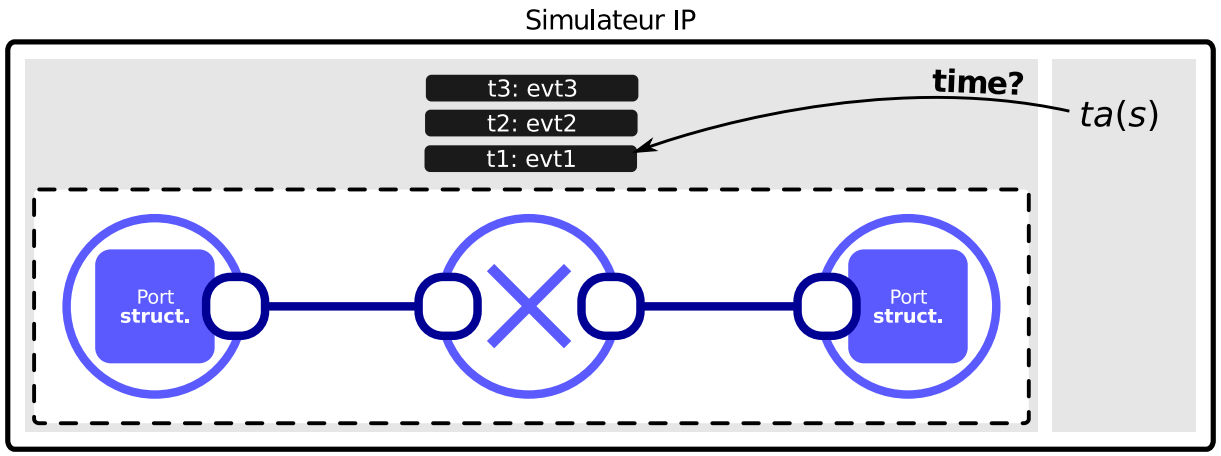
Introduction
Problématiques
Hypothèses et pré-requis
Propositions
- Stratégie de wrapping
- Ouvrir les modèles (structurel)
- Ouvrir les modèles (spatial)
- Ouvrir les simulateurs
- Bilan

Validation expérimentale
Cas d'utilisation
- Smart Heating
- Concept Grid

Conclusion
Perspectives

Simulateurs : Asservissement

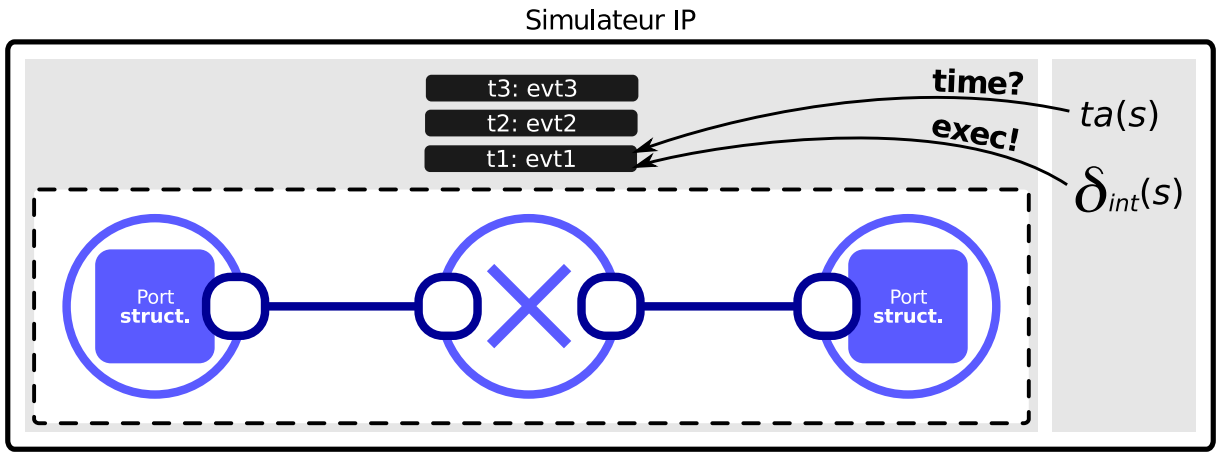
Il reste à **identifier et pouvoir déclencher** ta **et** δ_{int} :



- *ta : Récupération du temps de l'événement le plus imminent planifié dans la pile du simulateur*

Simulateurs : Asservissement

Il reste à **identifier et pouvoir déclencher** ta **et** δ_{int} :



- ta : *Récupération du temps de l'événement le plus imminent planifié dans la pile du simulateur*
- δ_{int} : *Requête à l'ordonnanceur du simulateur pour exécuter le prochain événement interne*

Simulateurs : Asservissement

- Les événements internes ne doivent pas être traités **en dehors des appels de** δ_{int}

Simulateurs : Asservissement

- Les événements internes ne doivent pas être traités **en dehors des appels de** δ_{int}
- Or, les événements internes sont généralement traités **en continu et sans interruption**

Simulateurs : Asservissement

- Les événements internes ne doivent pas être traités **en dehors des appels de** δ_{int}
- Or, les événements internes sont généralement traités **en continu et sans interruption**
- Il faut donc permettre à δ_{int} de **bloquer et relâcher la boucle** de simulation

Simulateurs : Asservissement

- Les événements internes ne doivent pas être traités **en dehors des appels de** δ_{int}
- Or, les événements internes sont généralement traités **en continu et sans interruption**
- Il faut donc permettre à δ_{int} de **bloquer et relâcher la boucle** de simulation

Asservissement de l'ordonnanceur à l'aide d'un verrou, **en fonction de l'architecture logicielle** du simulateur

Sommaire

Introduction
Problématiques
Hypothèses et pré-requis
Propositions
- Stratégie de wrapping
- Ouvrir les modèles (structurel)
- Ouvrir les modèles (spatial)
- Ouvrir les simulateurs
- Bilan

Validation expérimentale
Cas d'utilisation
- Smart Heating
- Concept Grid

Conclusion
Perspectives

Propositions : Bilan

- Caractérisation de **deux modes d'intégration** différents

Propositions : Bilan

- Caractérisation de **deux modes d'intégration** différents
- **Proposition des concepts** nécessaires (événements, ports, appendices, asservissement, etc.) pour les réaliser

Propositions : Bilan

- Caractérisation de **deux modes d'intégration** différents
- **Proposition des concepts** nécessaires (événements, ports, appendices, asservissement, etc.) pour les réaliser
- Proposition d'une **démarche de wrapping DEVS**, en utilisant le vocabulaire IP

Propositions : Bilan

- Caractérisation de **deux modes d'intégration** différents
- **Proposition des concepts** nécessaires (événements, ports, appendices, asservissement, etc.) pour les réaliser
- Proposition d'une **démarche de wrapping DEVS**, en utilisant le vocabulaire IP
- Proposition d'utilisation de sous-modèles IP essentiels **permettant à un·e expert·e IP de les manipuler** depuis son outil métier

Propositions : Bilan

- Caractérisation de **deux modes d'intégration** différents
- **Proposition des concepts** nécessaires (événements, ports, appendices, asservissement, etc.) pour les réaliser
- Proposition d'une **démarche de wrapping DEVS**, en utilisant le vocabulaire IP
- Proposition d'utilisation de sous-modèles IP essentiels **permettant à un·e expert·e IP de les manipuler** depuis son outil métier

La démarche peut-elle être concrètement mise en œuvre ?
Quel est l'impact de nos couplages sur les résultats de simulation ?

Sommaire

Introduction
Problématiques
Hypothèses et pré-requis
Propositions
- Stratégie de wrapping
- Ouvrir les modèles (structurel)
- Ouvrir les modèles (spatial)
- Ouvrir les simulateurs
- Bilan

Validation expérimentale
Cas d'utilisation
- Smart Heating
- Concept Grid

Conclusion
Perspectives

Validation expérimentale : Implémentations

- Stratégie de wrapping mise à l'épreuve avec **2 simulateurs IP reconnus** dans la communauté scientifique

Validation expérimentale : Implémentations

- Stratégie de wrapping mise à l'épreuve avec **2 simulateurs IP reconnus** dans la communauté scientifique
- **Bibliothèques IP/DEVS** mises à disposition pour NS-3 et OMNeT++/INET (*ports*, *appendices*, *ordonnanceur*, *wrappeur*) avec MECSYCO (réécrit en C++)

Validation expérimentale : Implémentations

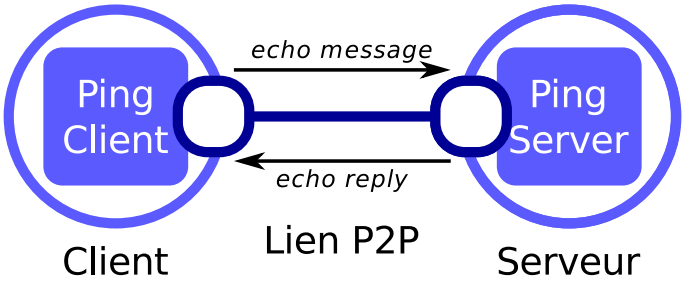
- Stratégie de wrapping mise à l'épreuve avec **2 simulateurs IP reconnus** dans la communauté scientifique
- **Bibliothèques IP/DEVS** mises à disposition pour NS-3 et OMNeT++/INET (*ports*, *appendices*, *ordonnanceur*, *wrappeur*) avec MECSYCO (réécrit en C++)
- Mise en œuvre facilitée **grâce à la démarche et aux concepts identifiés**

Validation expérimentale : Implémentations

- Stratégie de wrapping mise à l'épreuve avec **2 simulateurs IP reconnus** dans la communauté scientifique
- **Bibliothèques IP/DEVS** mises à disposition pour NS-3 et OMNeT++/INET (*ports*, *appendices*, *ordonnanceur*, *wrappeur*) avec MECSYCO (réécrit en C++)
- Mise en œuvre facilitée **grâce à la démarche et aux concepts identifiés**
- Modèles IP capables de communiquer avec **n'importe quel autre modèle intégré** à MECSYCO

Validation expérimentale : Système cible

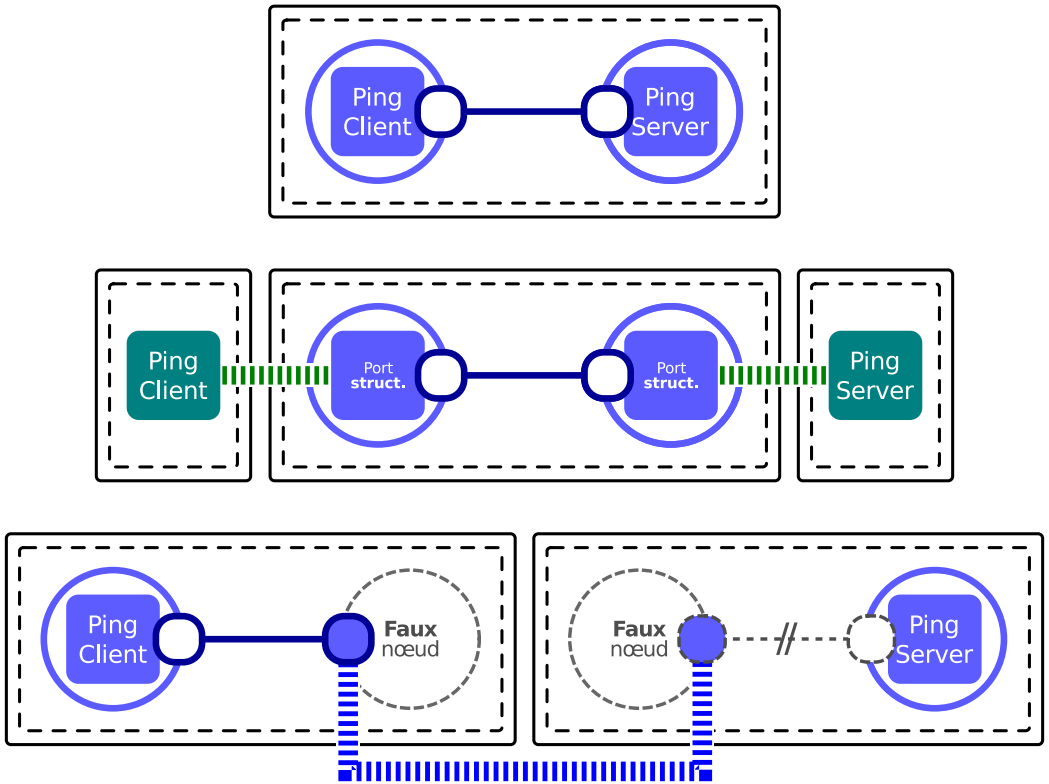
Les couplages structurels et spatiaux influencent-ils les résultats de simulation ?



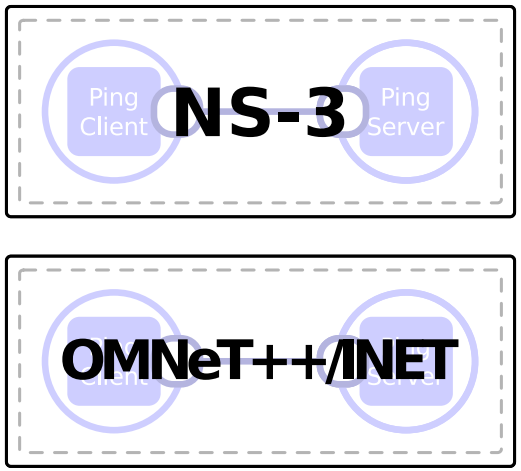
Système cible à modéliser :
Une machine client « pingue » une machine serveur, via un lien sans intermédiaire

Validation expérimentale : Multi-modèles

3 (multi-)modèles **représentent le même système** :

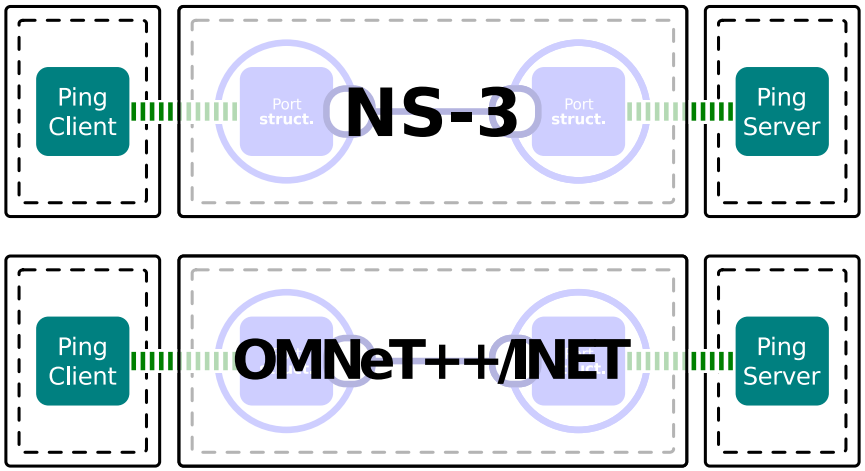


Validation expérimentale : Expériences témoins



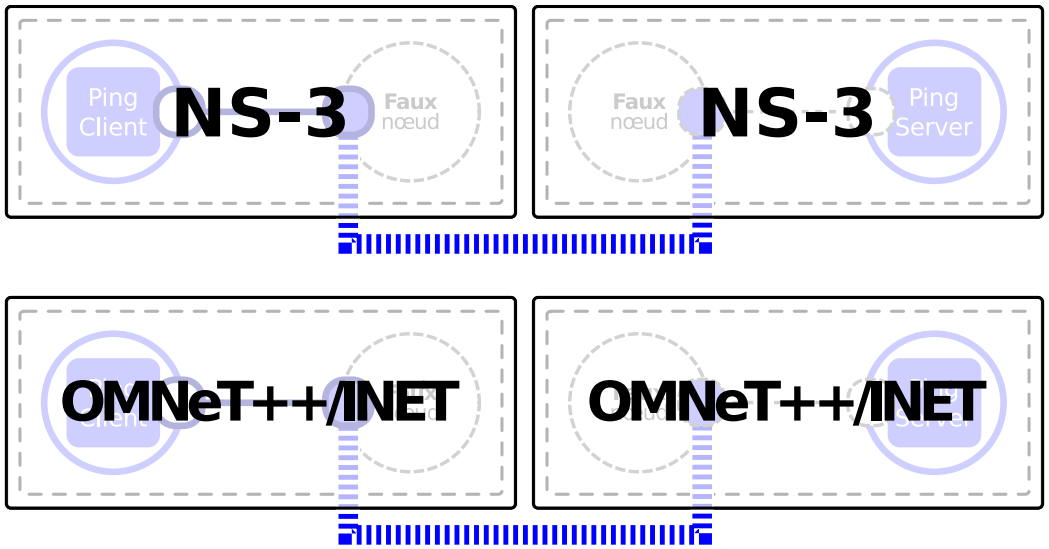
Modélisation entièrement **avec NS-3** et entièrement **avec OMNeT++/INET**

Validation expérimentale : Structurel



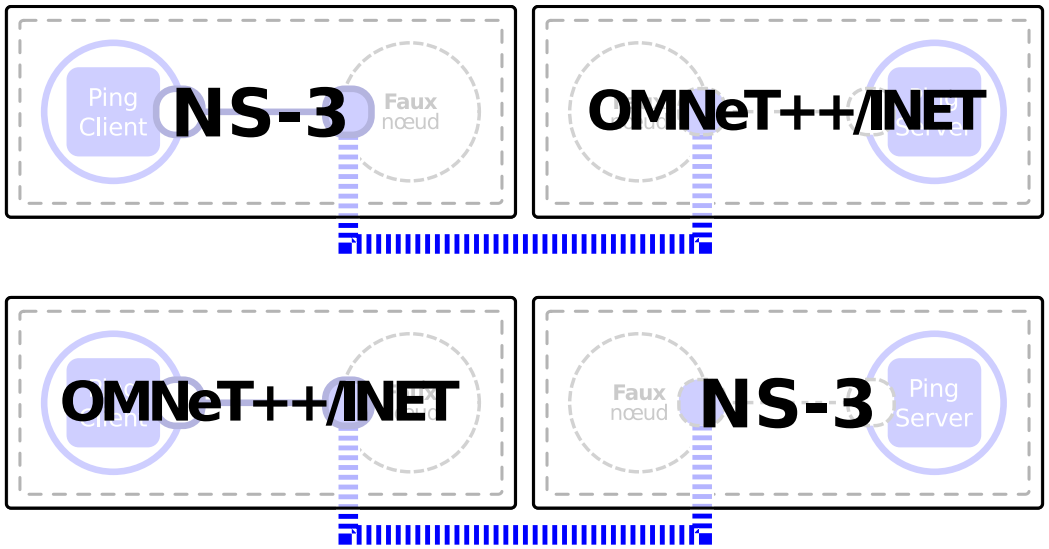
Externalisation des applications du ping **avec des couplages structurels**, pour la version NS-3 comme pour la version OMNeT++INET

Validation expérimentale : Spatial homogène



Simulation distribuée **avec des couplages spatiaux**, entre 2 instances de NS-3 et entre 2 instances de OMNeT++/INET

Validation expérimentale : Spatial hétérogène



Couplages spatiaux **en mixant les modèles** NS-3 et OMNeT++/INET

Validation expérimentale : Évaluations

Sachant que :

1. Le **comportement des applications est identique** quel que soit le (sous-)modèle utilisé

Validation expérimentale : Évaluations

Sachant que :

1. Le **comportement des applications est identique** quel que soit le (sous-)modèle utilisé
2. Les sous-modèles IP utilisés sont **décrits de la même façon en NS-3 et en OMNeT++/INET**

Validation expérimentale : Évaluations

Sachant que :

1. Le **comportement des applications est identique** quel que soit le (sous-)modèle utilisé
2. Les sous-modèles IP utilisés sont **décrits de la même façon en NS-3 et en OMNeT++/INET**

Et que les **résultats de simulation** (dates d'arrivée et départ des paquets à la ns) sont **identiques pour toutes les versions**

Validation expérimentale : Évaluations

Sachant que :

1. Le **comportement des applications est identique** quel que soit le (sous-)modèle utilisé
2. Les sous-modèles IP utilisés sont **décrits de la même façon en NS-3 et en OMNeT++/INET**

Et que les **résultats de simulation** (dates d'arrivée et départ des paquets à la ns) sont **identiques pour toutes les versions**

$\Longrightarrow$ *Les couplages structurels et spatiaux sont transparents : ils n'influencent pas les résultats de simulation*

Sommaire

Introduction
Problématiques
Hypothèses et pré-requis
Propositions
- Stratégie de wrapping
- Ouvrir les modèles (structurel)
- Ouvrir les modèles (spatial)
- Ouvrir les simulateurs
- Bilan

Validation expérimentale
Cas d'utilisation
- Smart Heating
- Concept Grid

Conclusion
Perspectives

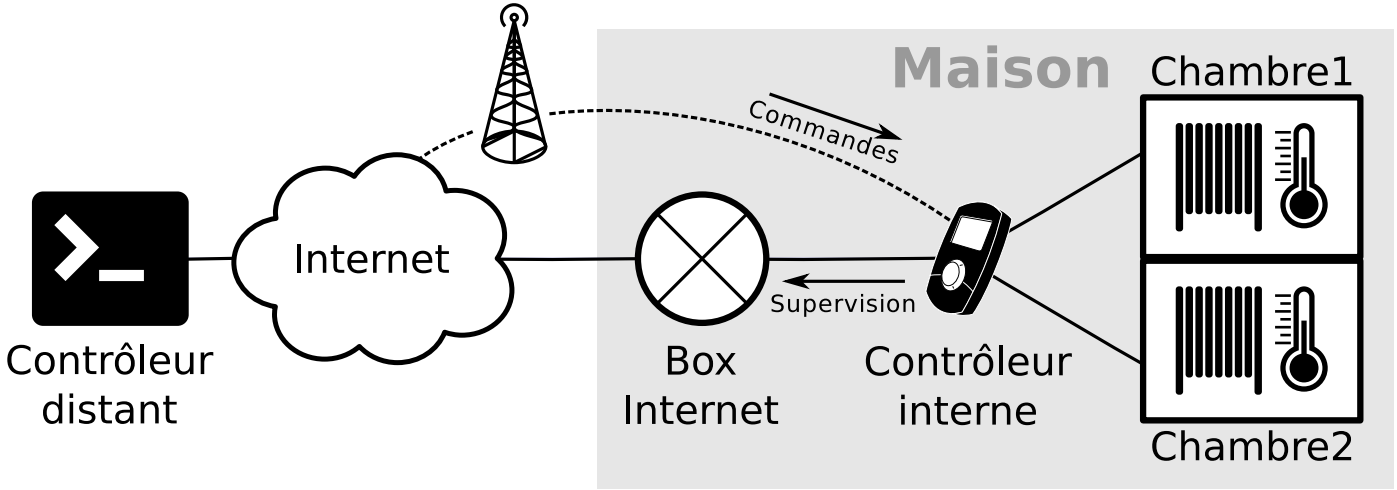
Sommaire

Introduction
Problématiques
Hypothèses et pré-requis
Propositions
- Stratégie de wrapping
- Ouvrir les modèles (structurel)
- Ouvrir les modèles (spatial)
- Ouvrir les simulateurs
- Bilan

Validation expérimentale
Cas d'utilisation
- Smart Heating
- Concept Grid

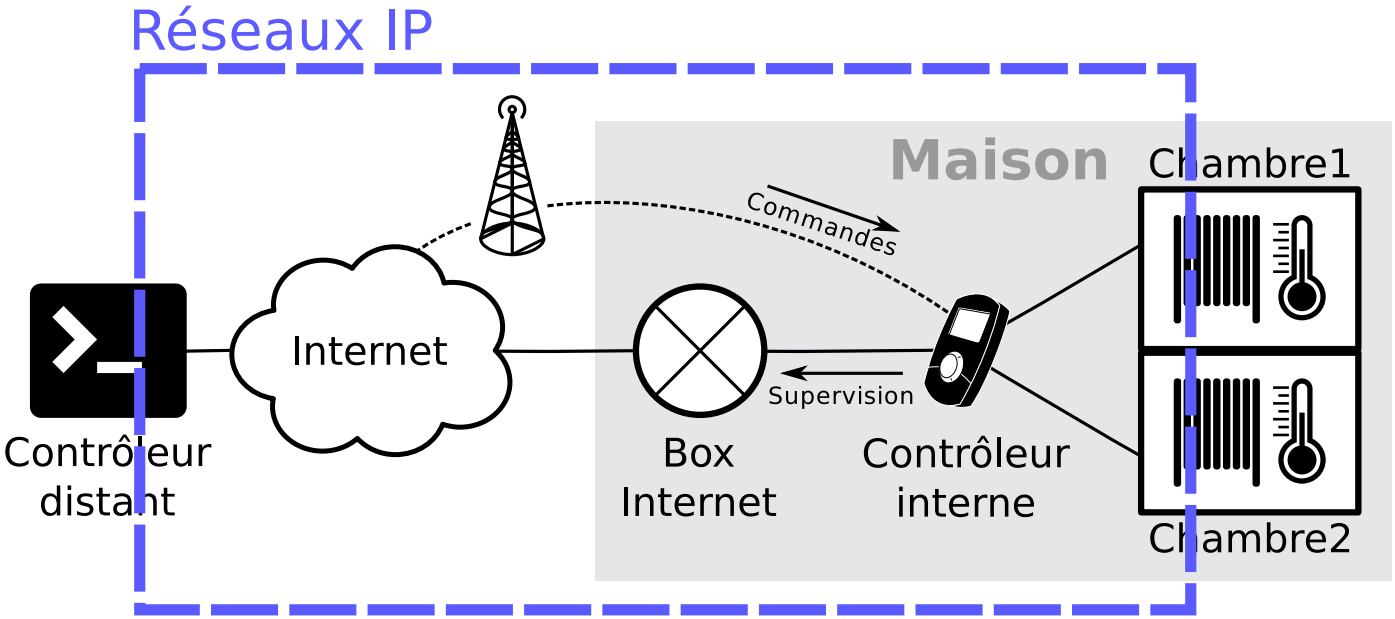
Conclusion
Perspectives

Cas d'utilisation : Smart Heating [Vaubourg16]



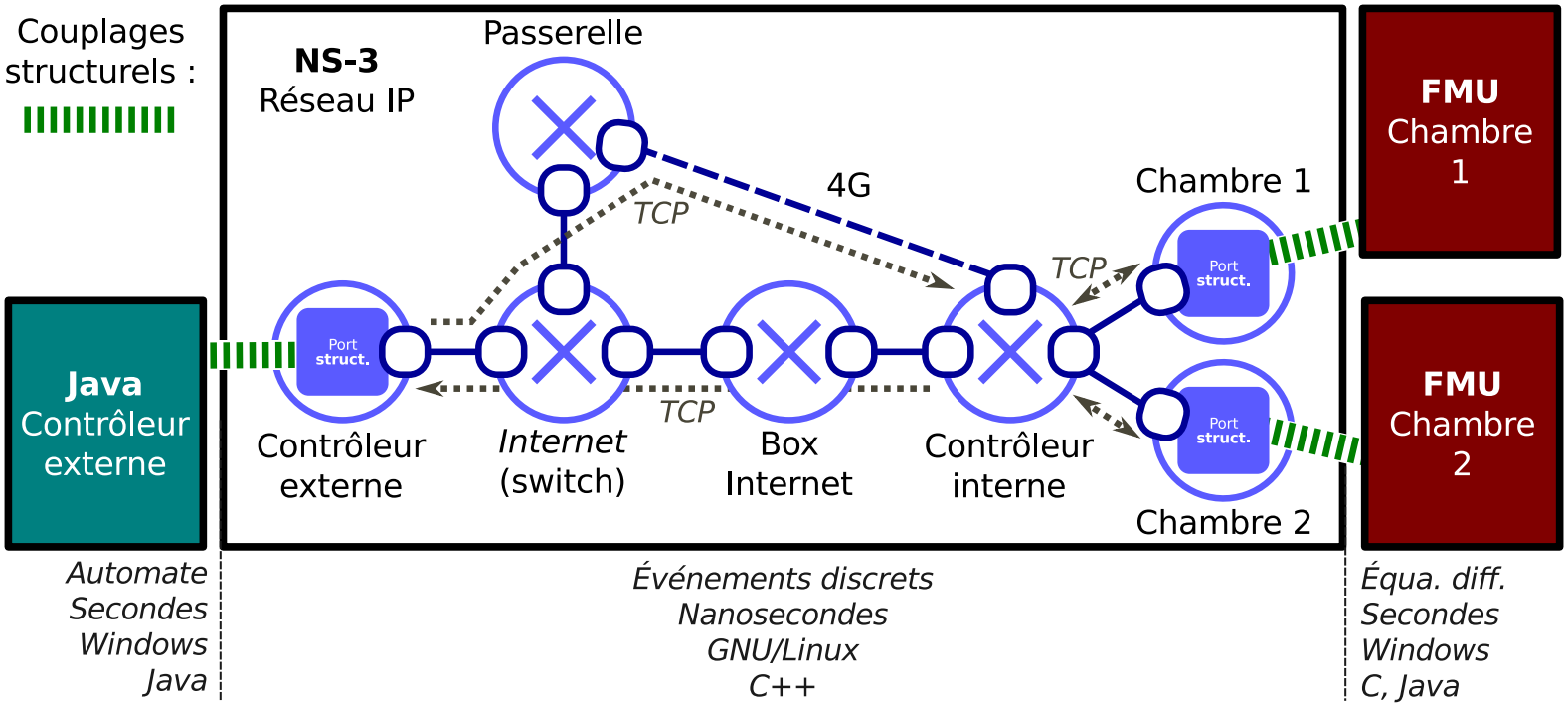
Système cible à M&S (chauffage intelligent)

Cas d'utilisation : Smart Heating [Vaubourg16]



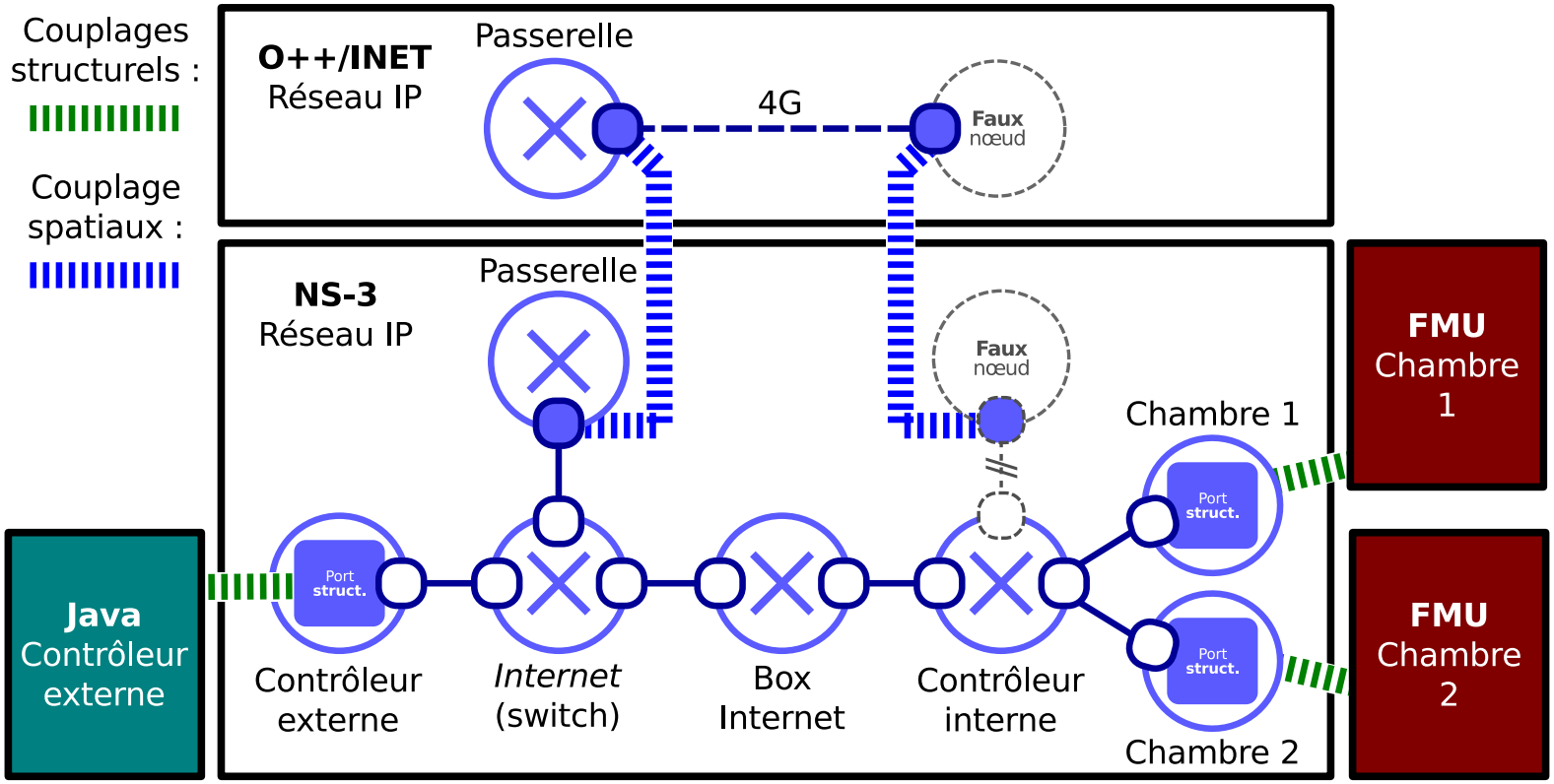
Système cible à M&S (chauffage intelligent)

Cas d'utilisation : Smart Heating



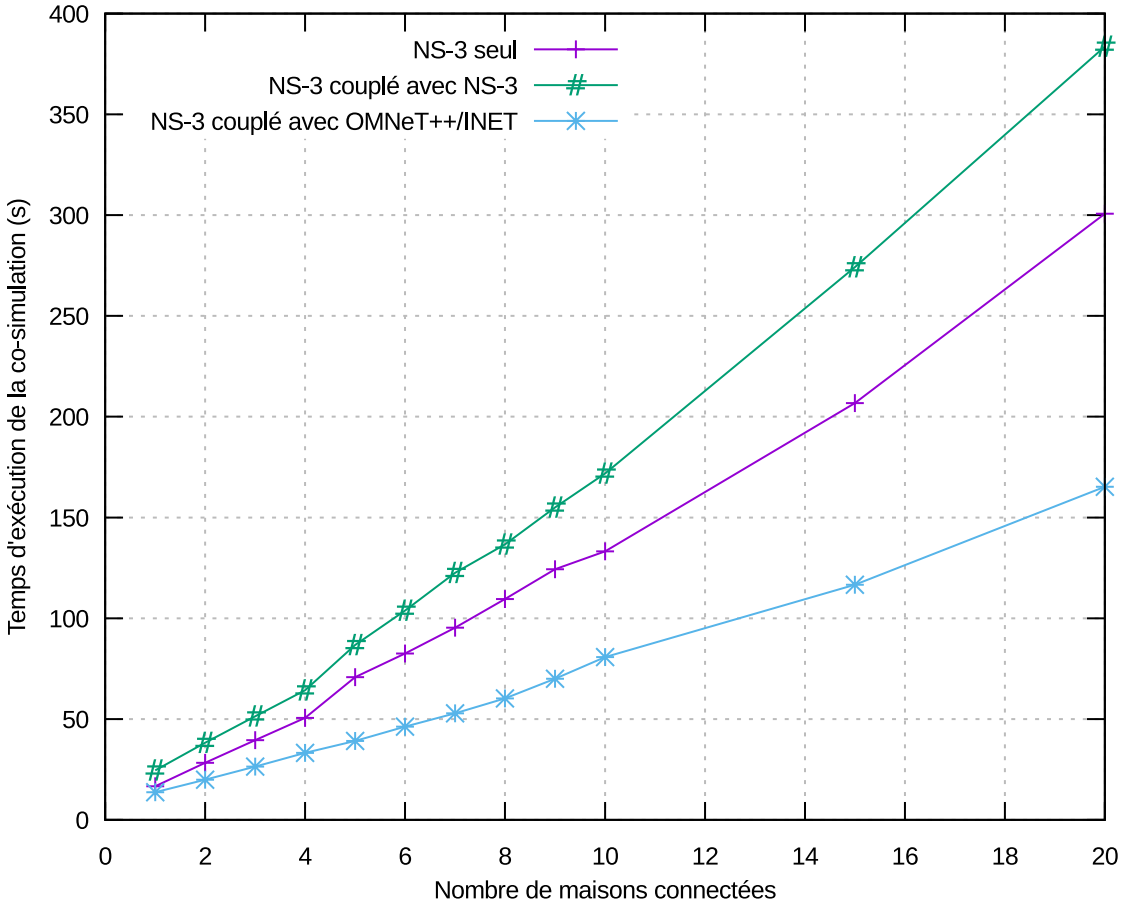
Couplages structurels avec le modèle IP

Cas d'utilisation : Smart Heating



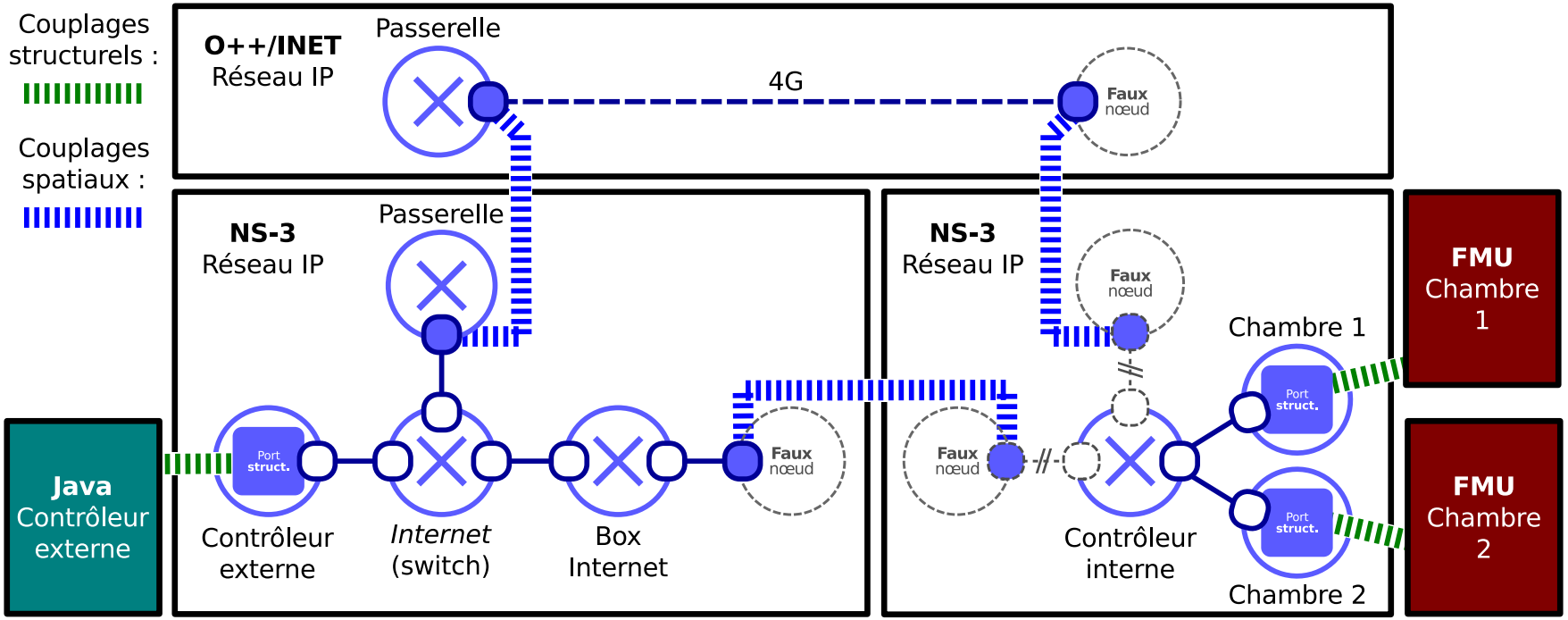
Test avec le sous-modèle 4G proposé dans la bibliothèque de OMNeT++/INET, avec des **couplages spatiaux**

Cas d'utilisation : Smart Heating



Passage à l'échelle, avec 20 maisons connectées
(102 simulateurs, 122 nœuds IP, 41 couplages struct., 40 spatiaux)

Cas d'utilisation : Smart Heating



Utilisation de la **modularité du multi-modèle** pour tester différentes versions du réseau interne

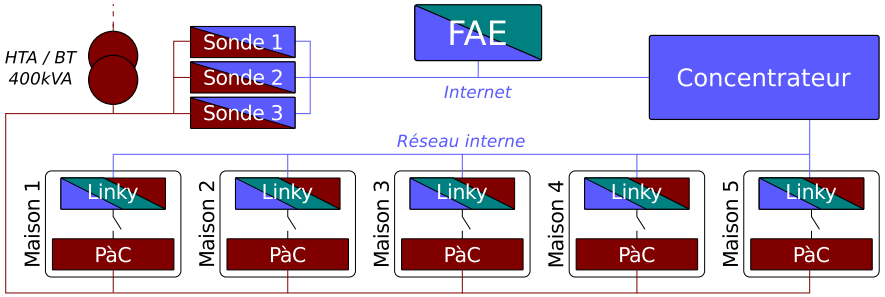
Sommaire

Introduction
Problématiques
Hypothèses et pré-requis
Propositions
- Stratégie de wrapping
- Ouvrir les modèles (structurel)
- Ouvrir les modèles (spatial)
- Ouvrir les simulateurs
- Bilan

Validation expérimentale
Cas d'utilisation
- Smart Heating
- Concept Grid

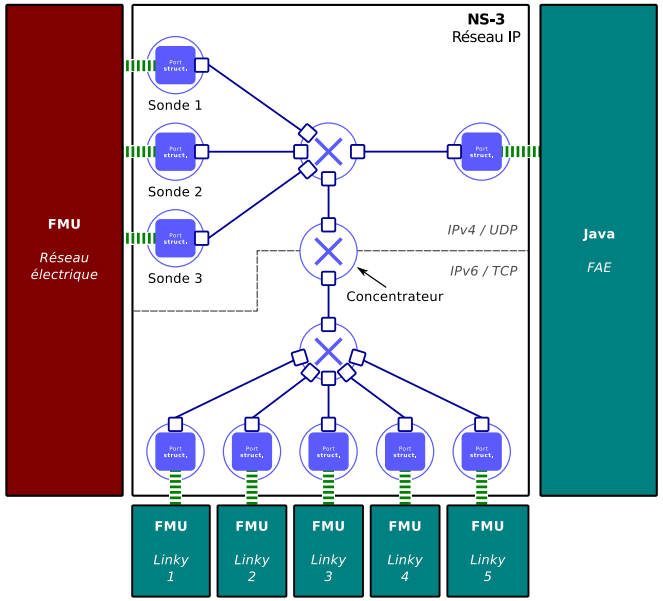
Conclusion
Perspectives

Cas d'utilisation : Concept Grid [Vaubourg15]



Multi-modélisation
(intégration de boîtes noires)

EDF Lab Les Renardières (Écuelles)



Validation

(visualisation par EIFER)

Exécution

Sommaire

Introduction
Problématiques
Hypothèses et pré-requis
Propositions
- Stratégie de wrapping
- Ouvrir les modèles (structurel)
- Ouvrir les modèles (spatial)
- Ouvrir les simulateurs
- Bilan

Validation expérimentale
Cas d'utilisation
- Smart Heating
- Concept Grid

Conclusion
Perspectives

Conclusion

Notre contribution permet d'intégrer des modèles IP à des multi-modèles DEVS, avec la stratégie de wrapping proposée

- Définition et proposition de **deux modes d'intégration**, avec les concepts associés, dans le vocabulaire IP : **structurel et spatial**

Conclusion

Notre contribution permet d'intégrer des modèles IP à des multi-modèles DEVS, avec la stratégie de wrapping proposée

- Définition et proposition de **deux modes d'intégration**, avec les concepts associés, dans le vocabulaire IP : **structurel et spatial**
- Mise en œuvre dans **NS-3 et OMNeT++/INET** sans modification directe des logiciels

Conclusion

Notre contribution permet d'intégrer des modèles IP à des multi-modèles DEVS, avec la stratégie de wrapping proposée

- Définition et proposition de **deux modes d'intégration**, avec les concepts associés, dans le vocabulaire IP : **structurel et spatial**
- Mise en œuvre dans **NS-3 et OMNeT++/INET** sans modification directe des logiciels
- **Preuves expérimentales** de l'absence d'influence sur les résultats de simulation

Conclusion

Notre contribution permet d'intégrer des modèles IP à des multi-modèles DEVS, avec la stratégie de wrapping proposée

- Définition et proposition de **deux modes d'intégration**, avec les concepts associés, dans le vocabulaire IP : **structurel et spatial**
- Mise en œuvre dans **NS-3 et OMNeT++/INET** sans modification directe des logiciels
- **Preuves expérimentales** de l'absence d'influence sur les résultats de simulation
- Application à des **cas d'utilisation internes et industriels**, avec validation des résultats

Conclusion

Notre travail permet :

- La modélisation du **transport sur IP de données générées** par n'importe quel simulateur spécialisé wrappé en DEVS

Conclusion

Notre travail permet :

- La modélisation du **transport sur IP de données générées** par n'importe quel simulateur spécialisé wrappé en DEVS
- La modélisation de réseaux IP complexes en combinant **plusieurs simulateurs IP incompatibles** entre eux

Conclusion

Notre travail permet :

- La modélisation du **transport sur IP de données générées** par n'importe quel simulateur spécialisé wrappé en DEVS
- La modélisation de réseaux IP complexes en combinant **plusieurs simulateurs IP incompatibles** entre eux
- De **comparer les sous-modèles** de différents simulateurs IP

Conclusion

Notre travail permet :

- La modélisation du **transport sur IP de données générées** par n'importe quel simulateur spécialisé wrappé en DEVS
- La modélisation de réseaux IP complexes en combinant **plusieurs simulateurs IP incompatibles** entre eux
- De **comparer les sous-modèles** de différents simulateurs IP
- De **distribuer des simulations IP** avec des simulateurs qui ne proposent pas cette possibilité

Conclusion

Notre travail permet :

- La modélisation du **transport sur IP de données générées** par n'importe quel simulateur spécialisé wrappé en DEVS
- La modélisation de réseaux IP complexes en combinant **plusieurs simulateurs IP incompatibles** entre eux
- De **comparer les sous-modèles** de différents simulateurs IP
- De **distribuer des simulations IP** avec des simulateurs qui ne proposent pas cette possibilité

$\Longrightarrow$ **De M&S des SCP avec les 3 domaines d'expertise réunis**

Perspectives

1. Proposer des solutions pour les **problèmes de partage des espace d'adressage** (*co-initialisation*)

Perspectives

1. Proposer des solutions pour les **problèmes de partage des espace d'adressage** (*co-initialisation*)
2. Confronter la stratégie de wrapping à **plus de simulateurs IP** différents

Perspectives

1. Proposer des solutions pour les **problèmes de partage des espace d'adressage** (*co-initialisation*)
2. Confronter la stratégie de wrapping à **plus de simulateurs IP** différents
3. **Réduire les hypothèses** sur les simulateurs IP (e.g. protocoles incomplets de [Riley01])

Perspectives

1. Proposer des solutions pour les **problèmes de partage des espace d'adressage** (*co-initialisation*)
2. Confronter la stratégie de wrapping à **plus de simulateurs IP** différents
3. **Réduire les hypothèses** sur les simulateurs IP (e.g. protocoles incomplets de [Riley01])
4. Profiter de l'intégration des simulateurs IP pour intégrer des modèles ***hardware/software in the loop***

Perspectives

1. Proposer des solutions pour les **problèmes de partage des espace d'adressage** (*co-initialisation*)
2. Confronter la stratégie de wrapping à **plus de simulateurs IP** différents
3. **Réduire les hypothèses** sur les simulateurs IP (e.g. protocoles incomplets de [Riley01])
4. Profiter de l'intégration des simulateurs IP pour intégrer des modèles ***hardware/software in the loop***
5. Poursuivre le travail sur la **génération des modèles IP en fonction des coupures** à faire au niveau de la topologie

Merci
de votre attention

Publications (1)

Conférences internationales avec actes :

1. Vaubourg, J., Chevrier, V., Ciarletta, L., and Camus, B. (2016). **Co-Simulation of IP Network Models in the Cyber-Physical Systems Context, using a DEVS-based Platform.** In *Proceedings of the Communications and Networking Simulation Symposium*, pages 193–200, Pasadena, LA, USA. Society for Computer Simulation International/ACM.
2. Vaubourg, J., Presse, Y., Camus, B., Bourjot, C., Ciarletta, L., Chevrier, V., Tavella, J.-P., and Morais, H. (2015). **Multi-agent Multi-Model Simulation of Smart Grids in the MS4SG Project.** In Demazeau, Y., Decker, K. S., Pérez, J. B., and Prieta, F. d. l., editors, *Advances in Practical Applications of Agents, Multi-Agent Systems, and Sustainability : The PAAMS Collection*, number 9086 in Lecture Notes in Computer Science, pages 240–251. Springer International Publishing.
3. Camus, B., Galtier, V., Caujolle, M., Chevrier, V., Vaubourg, J., Ciarletta, L., and Bourjot, C. (2016). **Hybrid Co-simulation of FMUs using DEV&DESS in MECSYCO.** In *Symposium on Theory of Modeling & Simulation - DEVS Integrative M&S Symposium*, Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation - DEVS Integrative M&S Symposium (TMS/DEVS 16), SCS/ACM (2016), pages 568–575, Pasadena, United States.
4. Duflot, M., Quinson, M., Masseglia, F., Roy, D., Vaubourg, J., and Viéville, T. (2015). **When sharing computer science with everyone also helps avoiding digital prejudices.** In *Proceedings of the 7th international Scratch conference* (Scratch2015AMS).

Revues nationales avec comité de lecture :

1. Masseglia, F., Quinson, M., Vaubourg, J., Poirel, V., Taillant, É., Arias, S., and Viennot, L. (2015). **Incitation à la découverte de la programmation.** *Bulletin de la société informatique de France, numéro HS1, février 2015*, pages 51–58.

Publications (2)

Démonstrations :

1. Vaubourg, J., Presse, Y., Camus, B., Bourjot, C., Ciarletta, L., Chevrier, V., Tavella, J.-P., Morais, H., Deneuville, B., and Chilard, O. (2015). **Smart Grids Simulation with MECSYCO.** In Demazeau, Y., Decker, K. S., Pérez, J. B., and Prieta, F. d. l., editors, *Advances in Practical Applications of Agents, Multi-Agent Systems, and Sustainability : The PAAMS Collection*, number 9086 in Lecture Notes in Computer Science, pages 320–323. Springer International Publishing.
2. Vaubourg, J., Presse, Y., Camus, B., Ciarletta, L., Chevrier, V., Tavella, J.-P., Deneuville, B., and Chilard, O. (2015). **Simulation de smart grids avec MECSYCO.** In Vercouter, L. and Picard, G., editors, *23es Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA'15)*, pages 217–218, Rennes, France. Cépaduès.

Soumission de revues :

1. Camus, B., Paris T., Vaubourg, J., Presse Y., Bourjot C., Ciarletta L. and Chevrier V. (2017). **Co-simulation of Cyber-Physical Systems with the DEVS Wrapping Platform MECSYCO.** Submitted to *Simulation : Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*.
2. Camus, B., Vaubourg, J., Paris T., Presse Y., Bourjot C., Ciarletta L. and Chevrier V. (2017). **Wrapping DEVS de modèles IP dans MECSYCO pour la co-simulation de systèmes cyber-physiques.** Submitted to *Technique et Science Informatiques (TSI)*.

Rapports techniques :

1. Vaubourg, J., Chevrier, V., and Ciarletta, L. (2015). **Intégration de simulateurs existants à une plateforme de co-simulation basée sur DEVS.** In *Archives Ouvertes HAL*.
2. Vaubourg, J., Ciarletta, L., and Chevrier, V. (2015). **Concept Grid : Réseau de télécommunications.** Non-Public Industrial Deliverable.

Publications (3)

Dépôts APP :

1. Contributions au développement du cœur Java de MECSYCO : dépôt APP *[MECSYCO-re-Java]* du 25/03/2015 (réf. *IDDN FR 001 14008 000 S A 2015 000 10000*).
2. Contributions au développement du cœur C++ de MECSYCO : dépôt APP *[MECSYCO-re-C++]* du 25/11/2016 (réf. *IDDN FR 001 520035 000 SP 2016 000 10000*).
3. Développement de l'artéfact de modèle NS-3 pour MECSYCO C++ : dépôt *[MMA4NS3]* en cours.
4. Développement de l'artéfact de modèle OMNeT++/INET pour MECSYCO C++ : dépôt *[MMA4Omnet++]* en cours.

Bibliographie

Ramat06 Éric Ramat (2006). *Modélisation et Simulation Multi-agents, Application pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, volume Chapitre 2. Hermes Sciences.

Zeigler00 Zeigler, B. P., Kim, T. G., and Praehofer, H. (2000). *Theory of Modeling and Simulation*. Academic Press, Inc., Orlando, FL, USA, 2nd edition.

Vangheluwe00 Vangheluwe, H. (2000a). DEVS as a common denominator for multi-formalism hybrid systems modelling. In *IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design, 2000. CACSD 2000*, pages 129–134.

Quesnel09 Quesnel, G., Duboz, R., and Ramat, É. (2009). The Virtual Laboratory Environment – An operational framework for multi-modelling, simulation and analysis of complex dynamical systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17(4) :641–653.

Chandy79 Chandy, K. and Misra, J. (1979). Distributed Simulation : A Case Study in Design and Verification of Distributed Programs. *IEEE Transactions on Software Engineering*, SE-5(5) :440–452.

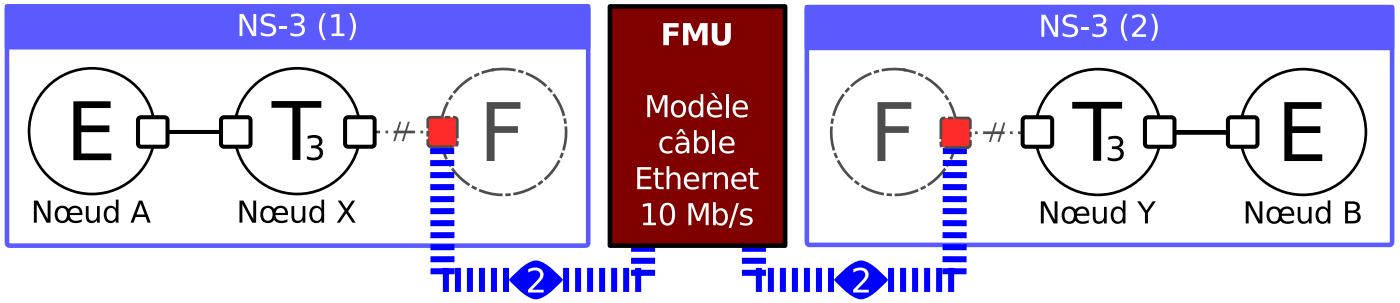
Camus15 Camus, B. (2015). *Environnement Multi-agent pour la Multi-modélisation et Simulation des Systèmes Complexes*. phdthesis, Université de Lorraine.

Vaubourg16 Vaubourg, J., Chevrier, V., Ciarletta, L., and Camus, B. (2016). Co-Simulation of IP Network Models in the Cyber-Physical Systems Context, using a DEVS-based Platform. In *Proceedings of the Communications and Networking Simulation Symposium*, pages 193–200, Pasadena, LA, USA. Society for Computer Simulation International/ACM.

Vaubourg15 Vaubourg, J., Presse, Y., Camus, B., Bourjot, C., Ciarletta, L., Chevrier, V., Tavella, J.-P., and Morais, H. (2015). Multi-agent Multi-Model Simulation of Smart Grids in the MS4SG Project. In Demazeau, Y., Decker, K. S., Pérez, J. B., and Prieta, F. d. l., editors, *Advances in Practical Applications of Agents, Multi-Agent Systems, and Sustainability : The PAAMS Collection*, number 9086 in Lecture Notes in Computer Science, pages 240–251. Springer International Publishing.

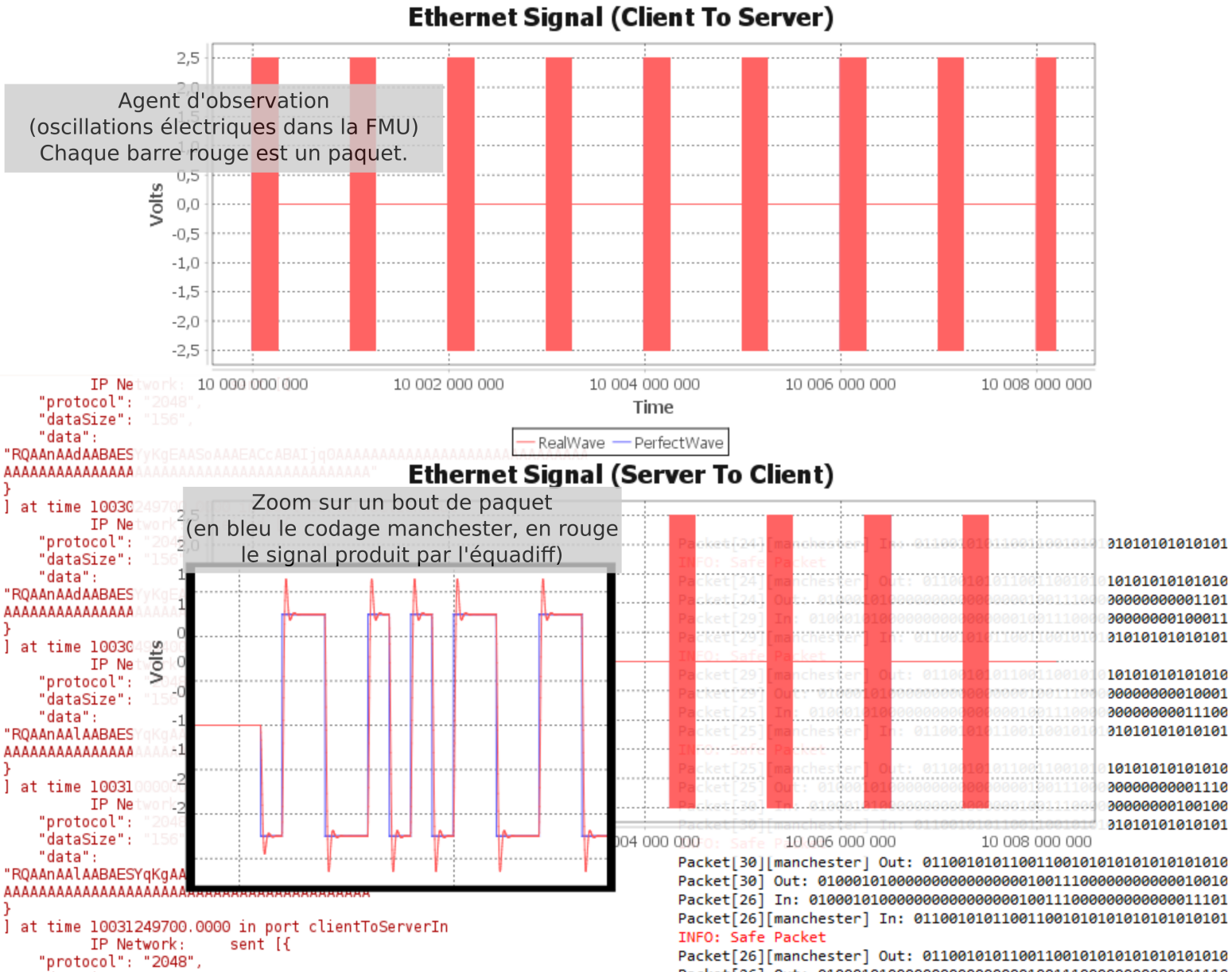
Riley01 Riley, G., Ammar, M., Fujimoto, R., Xu, D., and Perumalla, K. (2001). Distributed network simulations using the dynamic simulation backplane. In *Distributed Computing Systems, 2001. 21st International Conference on.*, pages 181–188.

Couplage spatial de niveau 2

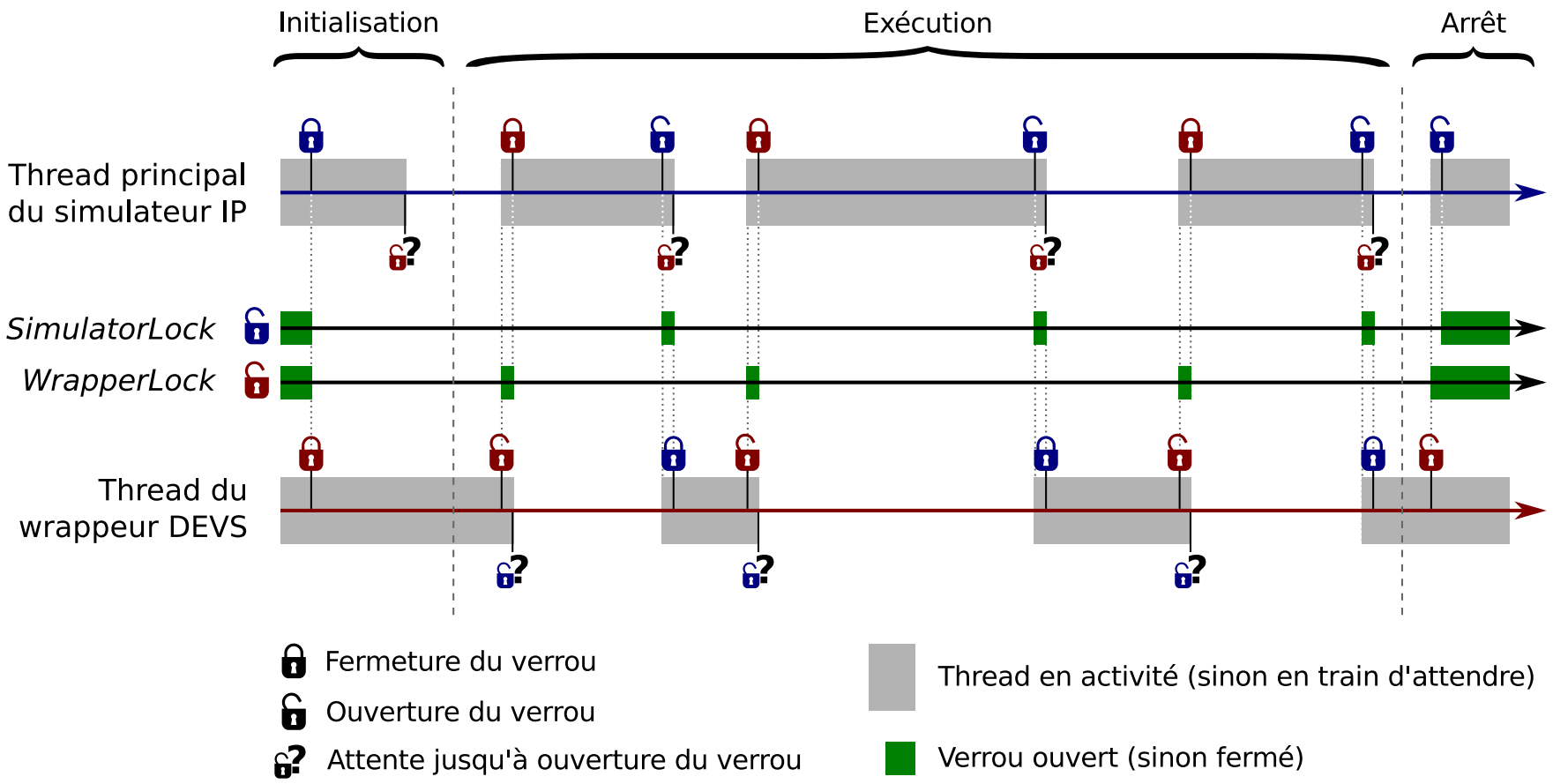


1. DEVS code les octets en Manchester
2. DESS reçoit les bits 1 à 1 à la fréquence d'échantillonnage
3. DESS transforme le signal parfait en signal électrique (avec bruit)
4. DEVS récupère les bits à la bonne fréquence
5. DEVS décode le Manchester

Couplage spatial de niveau 2



Synchronisation par verrous



Dissection port structurel

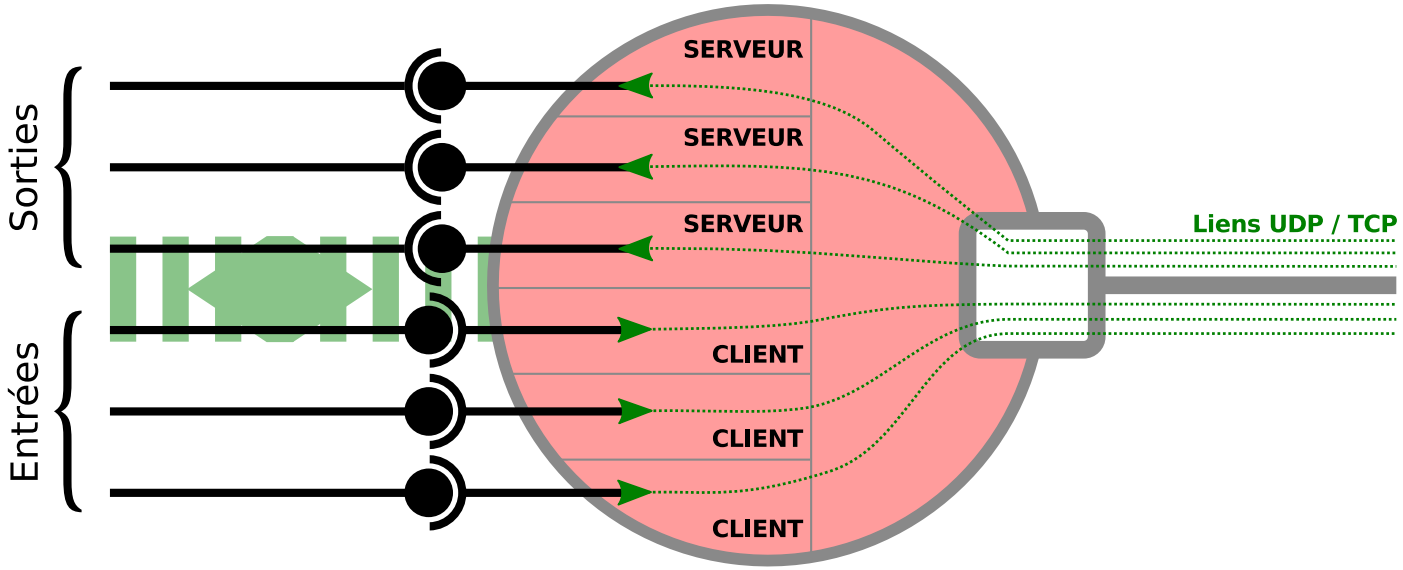
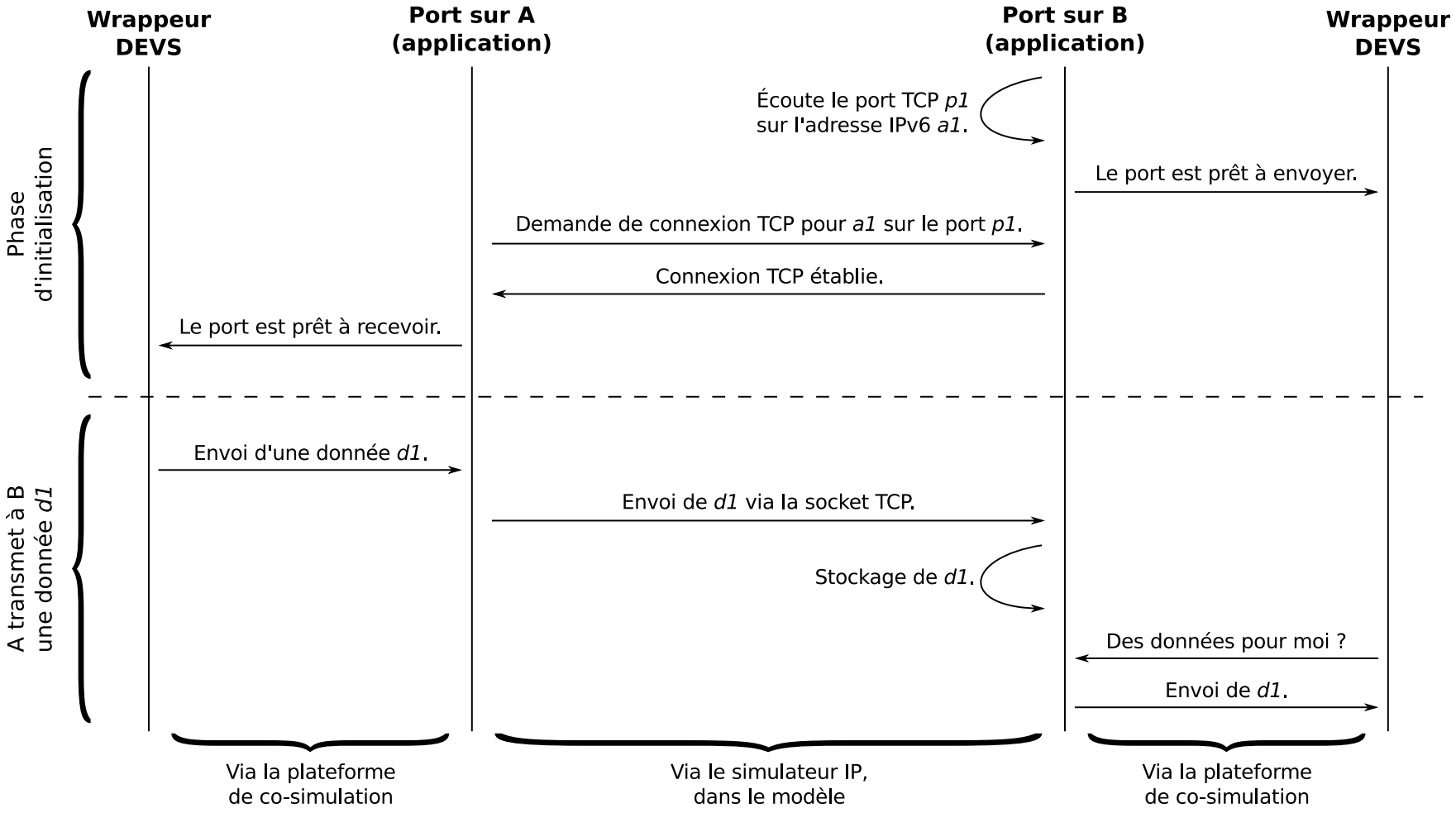
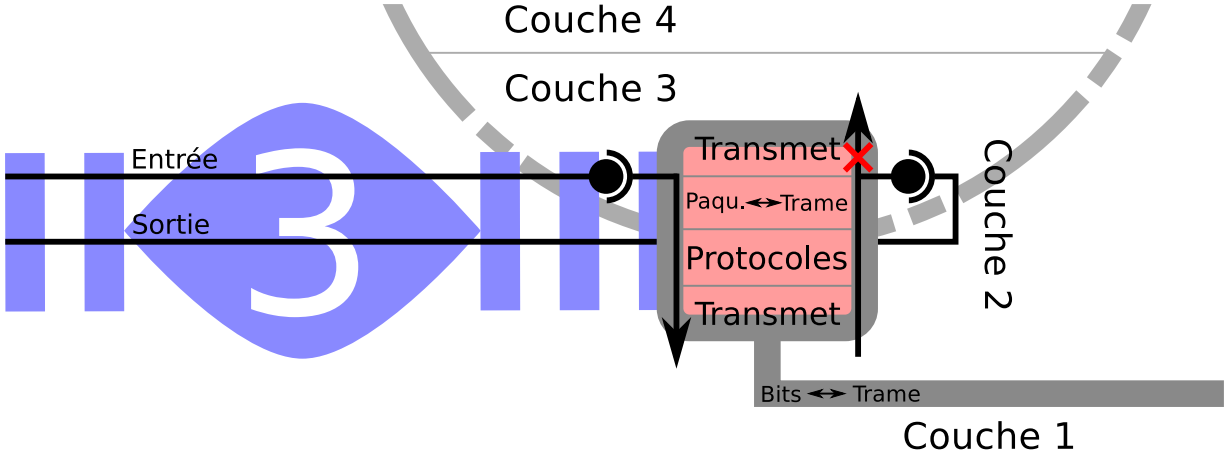


Diagramme port structurel



Dissection ports spatiaux



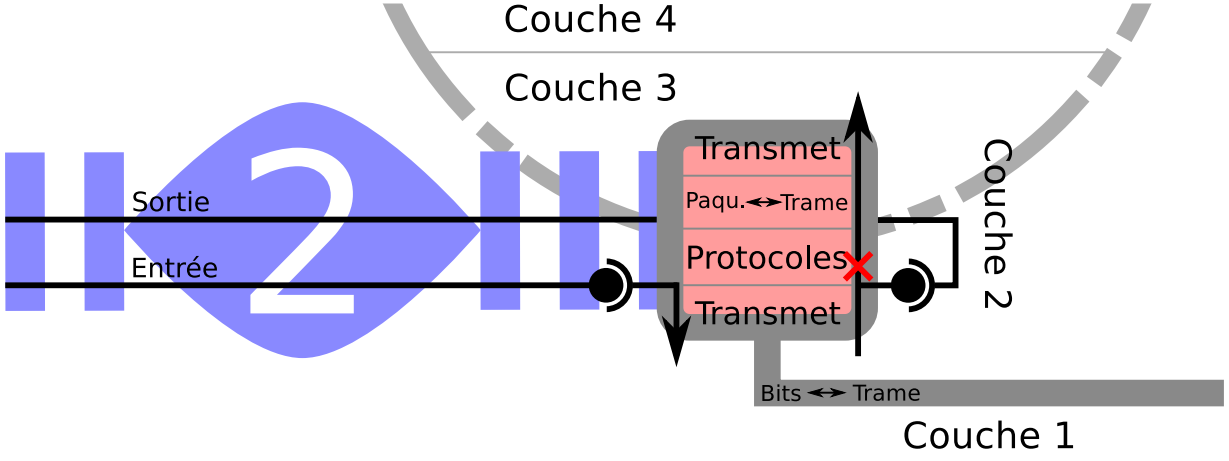
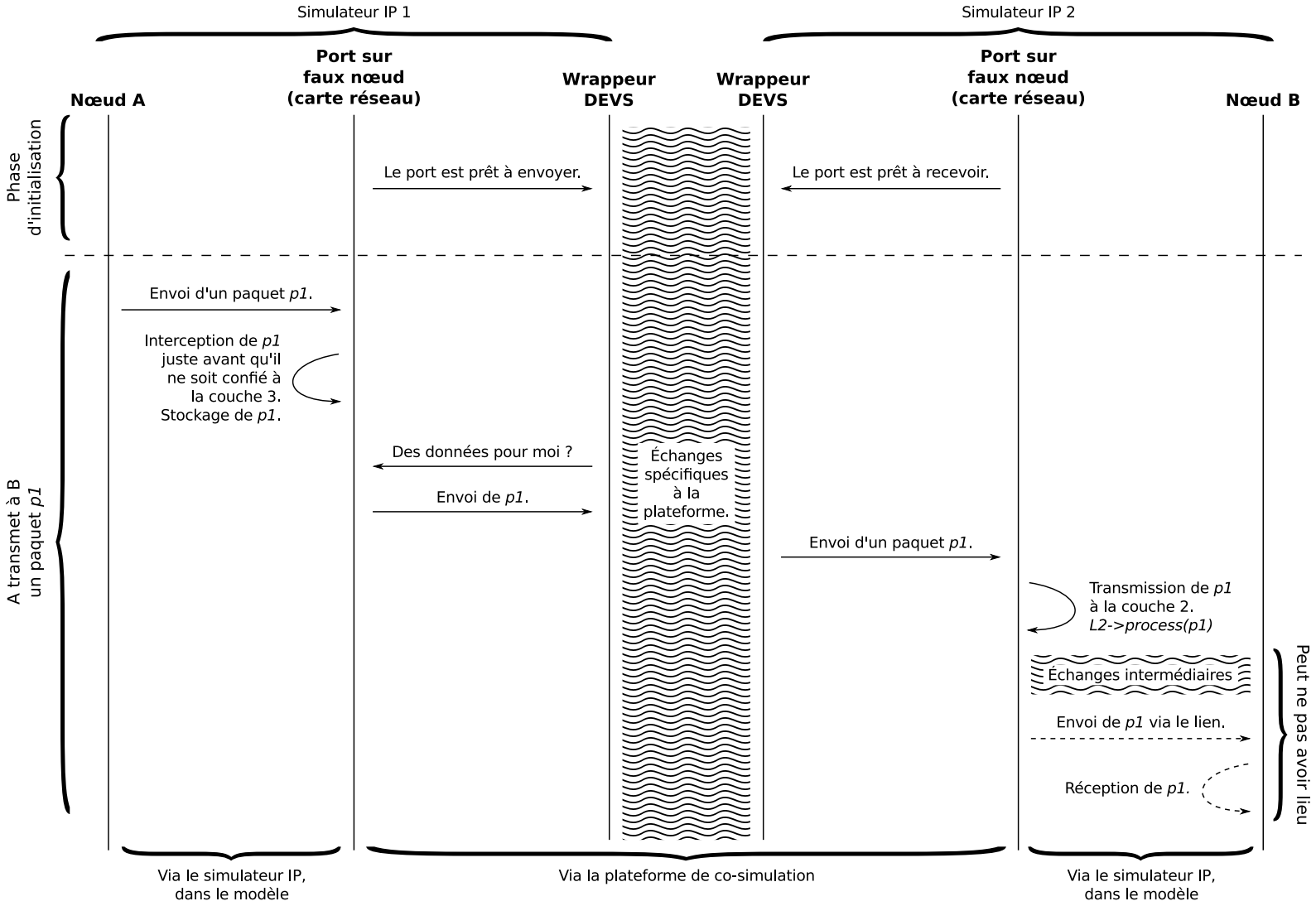
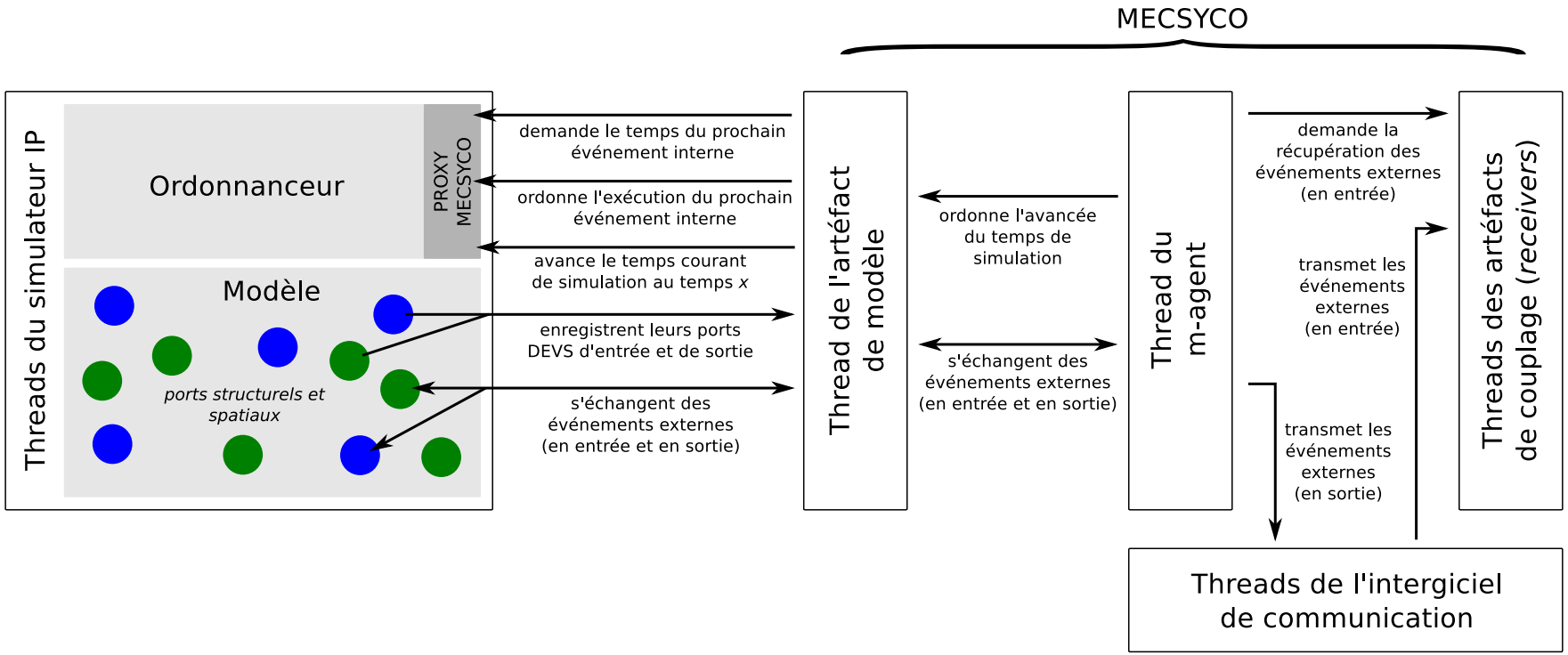


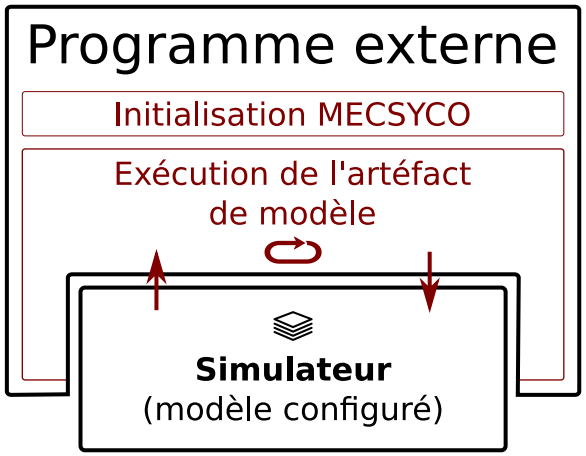
Diagramme port spatial

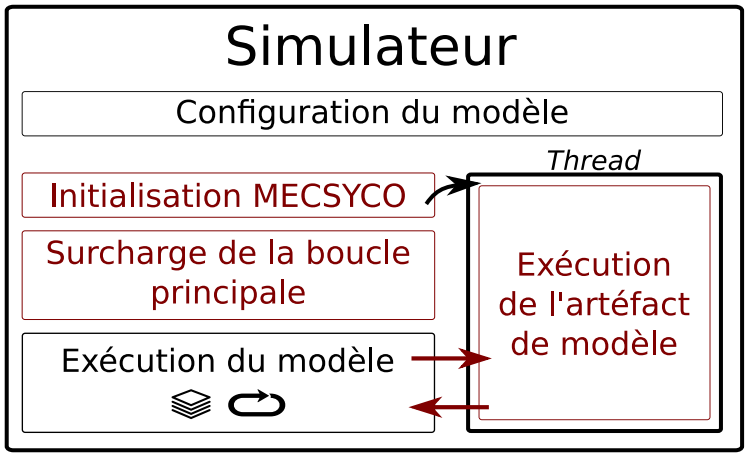
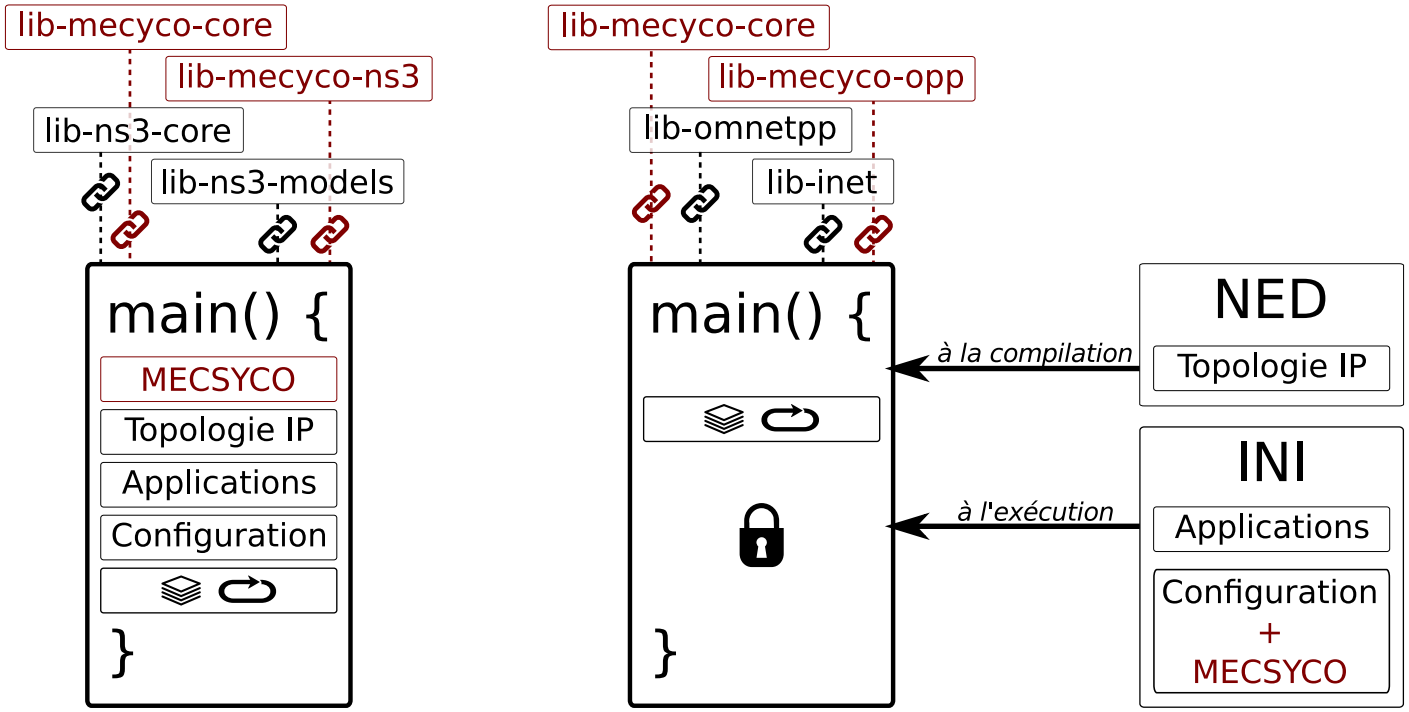


Organisation des threads



Ouverture simulateurs : interne ou externe





Ouverture simulateurs : boucle principale