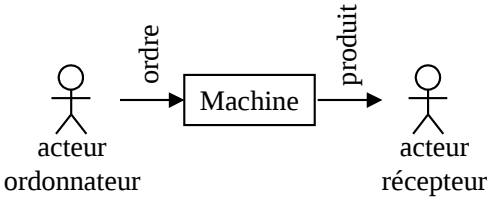
Travaux Dirigés n°1
Ingénierie des protocoles - Réseaux de Petri
Correction

Question 1. Modélisation d'un atelier de fabrication

Question 1.1. Modélisation d'une machine de fabrication simple

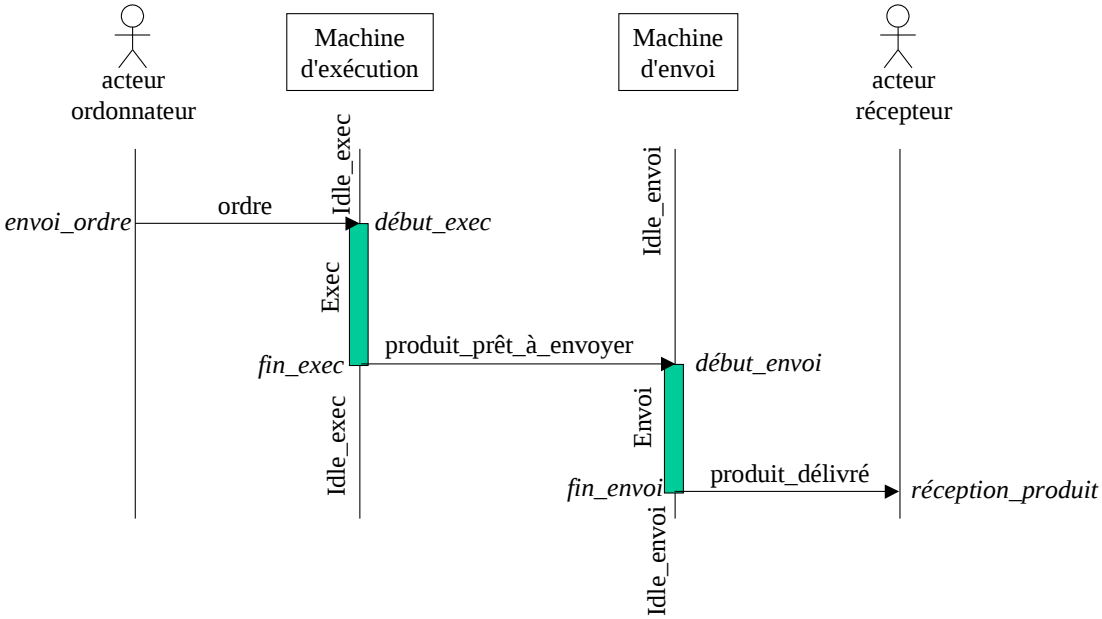
Considérons une première analyse du système selon une approche à la UML. Le diagramme des cas d'utilisation ci-dessous donne l'ensemble des acteurs externes du système ainsi que les interactions.



Toutefois, cette figure n'aide par à préciser le mode des interactions entre les deux acteurs et la machine : est-ce une communication synchrone, du type rendez-vous, ou asynchrone ? Pour répondre à cette question, il est nécessaire d'imaginer plusieurs scénarios.

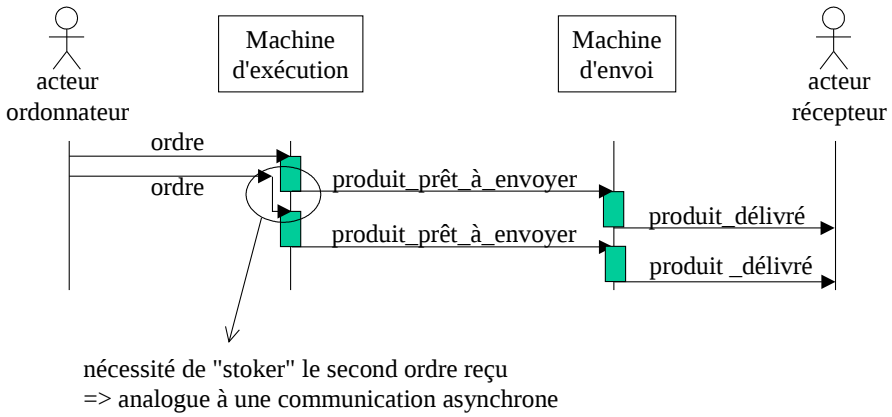
La machine est décomposée, selon l'énoncé, en deux machines organisées en pipe-line : une machine d'exécution et une machine d'envoi. On peut alors décrire l'ensemble des scénarios par des diagrammes de séquences. Trois scénarios sont envisageables :

1er scénario :



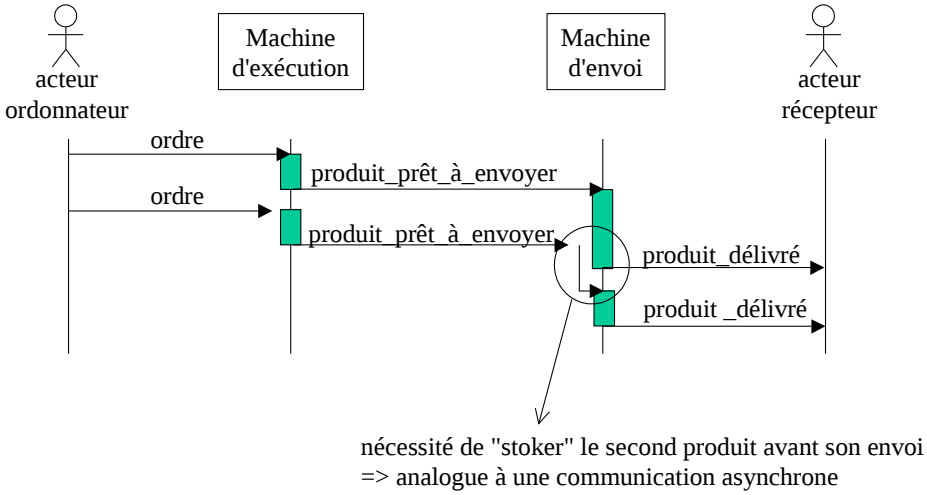
Ce premier scénario montre les états et les événements présents dans le système. Les états Idle_exec, Exec, Idle_envoi et Envoi deviendront des places, tandis que les événements envoi_ordre, début_exec, fin_exec… réception_produit deviendront des transitions. Toutefois, ce premier scénario n'indique toujours pas le besoin en synchronisation entre les différentes parties du système. Ce besoin apparaît avec les deux scénarios suivants.

2ème scénario : arrivée d'un ordre alors que la machine d'exécution travaille



Ce second scénario montre que la communication entre l'acteur ordonnateur et la machine d'exécution nécessite une place pour stocker les ordres (qui seront donc modélisés comme des jetons) en attendant leur traitement par la machine.

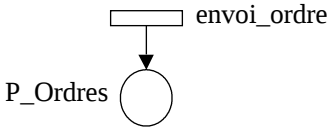
3ème scénario : sortie d'un produit à envoyer alors que la machine d'envoi travaille



Ce troisième scénario montre que la communication entre la machine d'exécution et la machine d'envoi nécessite une place pour stocker les produits à envoyer (qui seront donc modélisés comme des jetons) en attendant leur traitement par la machine d'envoi.

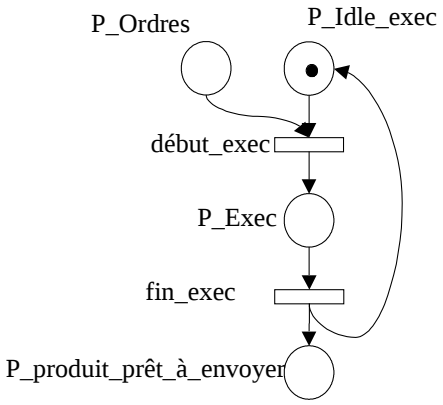
De même on fera l'hypothèse que la communication entre la machine d'envoi et l'acteur récepteur est asynchrone. Les produits délivrés seront stockés dans une place avant réception effective (événement réception_produit) par l'acteur récepteur.

Modélisation de l'acteur « ordonnateur » :
L'acteur « ordonnateur » se contente, d'après ces trois scénarios, d'envoyer un ordre indépendamment de l'état des machines. Cet ordre est stocké en attendant son traitement par la machine. Ce comportement peut être modélisé par le RdP suivant :



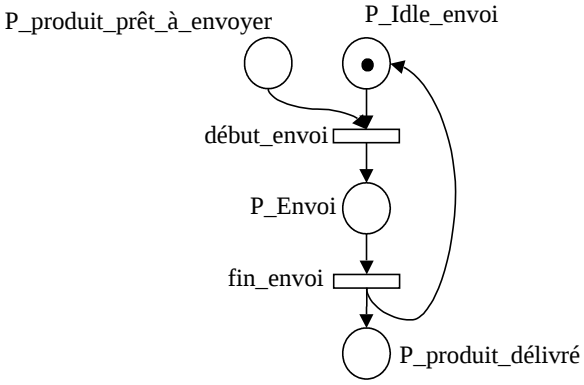
La place P_Ordres contiendra autant de jetons que d'ordres émis et en attente de traitement. Cette place assurera la communication de type asynchrone entre l'acteur ordonnateur et la machine d'exécution identifiée par le deuxième scénario. L'envoi d'un ordre est modélisé par le tir de la transition « envoi_ordre », transition qui n'a aucune précondition, et qui peut donc être tirée à tout moment.

Modélisation de la machine d'exécution :
Un modèle simple de cette machine est donné par le RdP suivant :



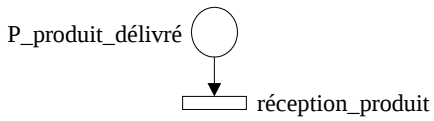
Cette machine, selon ce modèle, a deux états : idle et en exécution. Ces deux états correspondent aux deux places P_Idle_exec et P_Exec. On retrouve les deux états identifiés sur le digramme de séquence du premier scénario. La fin d'une exécution provoque la production d'un produit à envoyer, modélisé par un jeton dans la place « P_produit_prêt_à_envoyer ». Cette dernière place assurera la communication de type asynchrone entre les machines d'exécution et d'envoi identifiée par le troisième scénario.

Modélisation de la machine d'envoi :
La machine d'envoi est similaire à la machine d'exécution :

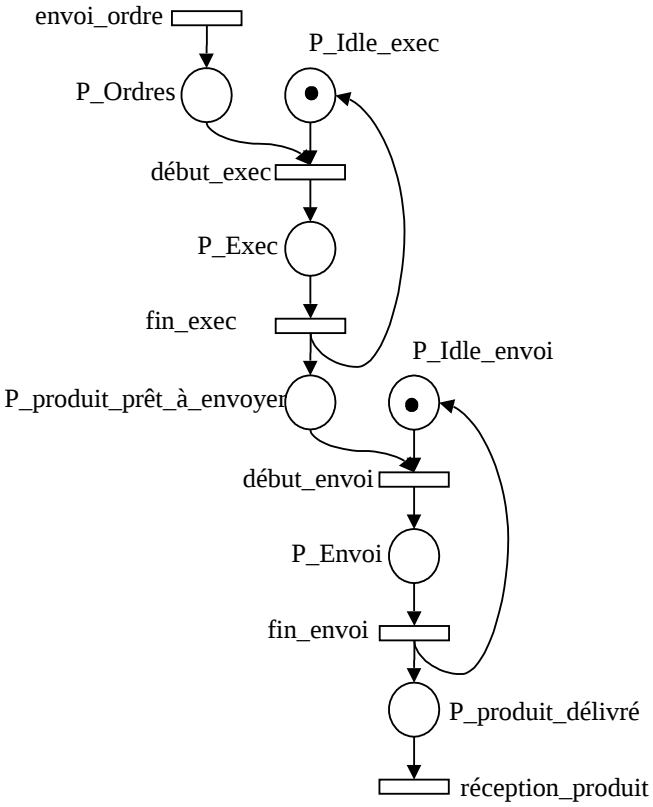


Cette machine a deux états : idle et en envoi. Elle passe d'idle à envoi sur réception d'un produit à envoyer. Enfin, la fin de l'envoi provoque la production d'un « produit_délivré » modélisé par la production d'un jeton dans la place P_produit_délivré. Cette dernière place assurera la communication de type asynchrone entre la machine d'envoi et l'acteur récepteur.

Modélisation de l'acteur « récepteur » :
L'acteur « récepteur » se contente, d'après ces trois scénarios, d'attendre et consommer les « produits » les uns après les autres dès que ceux-ci sont délivrés. Ce comportement peut être modélisé par le RdP suivant :

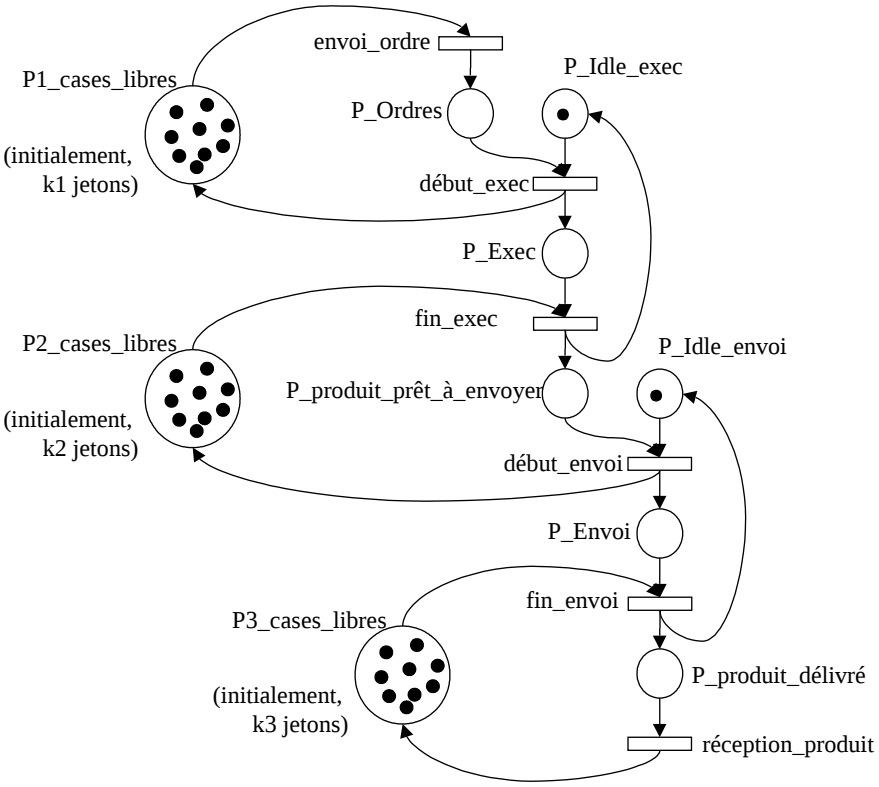


Modélisation du système global :
Les communications entre les différents acteurs et machines étant asynchrones, le modèle global est construit en fusionnant les places de même nom. Ce qui donne le modèle RdP suivant :



Il apparaît clairement que la place « P_ordres » n'est pas bornée. De même, les places « P_produit_prêt_à_envoyer » et « P_produit_délivré » ne sont pas bornées (il est facile de construire un marquage M1 tel que M1(P_Idle_exec)=1, M1(P_Idle_envoi)=1, M1(P_produit_prêt_à_envoyer)=1 et M1(P_produit_délivré)=1 et M1(p)=0 pour toutes les autres places p. Ce marquage est strictement supérieur au marquage initial, en particulier pour les places « P_produit_prêt_à_envoyer » et « P_produit_délivré », ce qui montre que ces places ne sont pas bornées.

Ce caractère non borné traduit une incorrection dans la modélisation. Pour corriger ce problème, il est nécessaire d'introduire une capacité maximale pour ces places, capacités notées respectivement k1, k2 et k3, et introduire un mécanisme interdisant la production d'un ordre, d'un produit prêt à être envoyé, et d'un produit délivré, lorsque ces capacités sont respectivement atteintes. Un tel mécanisme peut être modélisé par l'ajout de places supplémentaires caractérisant les « cases » libres pouvant stocker des ordres, des produits prêts à êtres envoyés, et des produits délivrés. Le modèle global est donné par le RdP suivant :



Selon ce nouveau modèle, l'acteur ordonnateur ne peut envoyer un ordre que s'il y a encore au moins un jeton dans la place P1_cases-libres, c'est-à-dire s'il y a encore un espace pour stocker cet ordre. De même pour la production d'un produit prêt à être envoyé et d'un produit délivré.

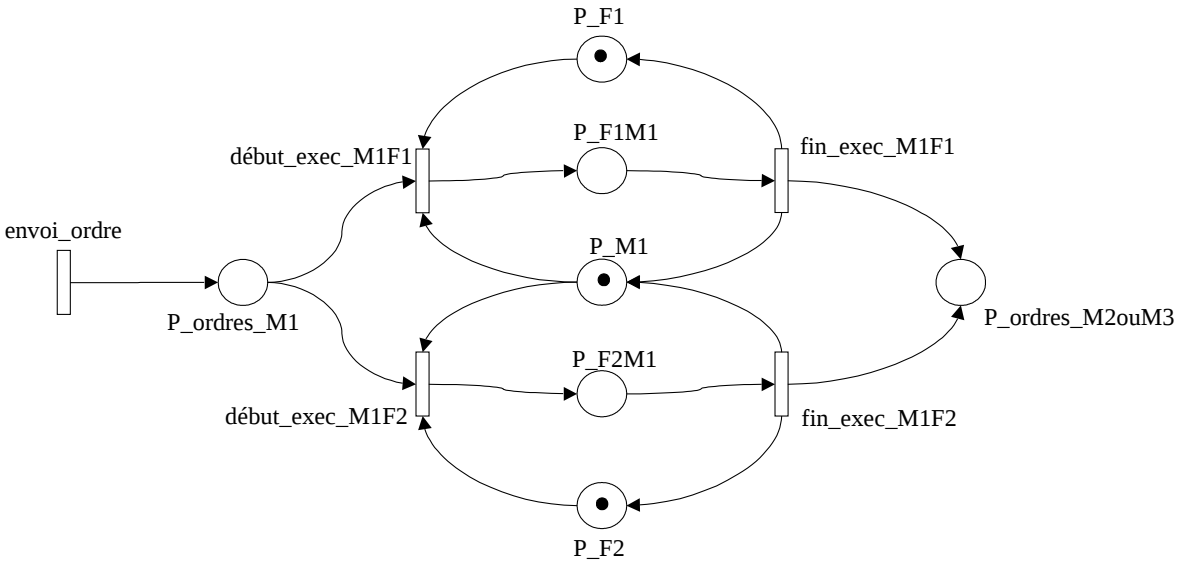
Il est facile de voir que les couples de places (« P1_cases_libres », « P_ordres »), (« P2_cases_libres », « P_produit_prêt_à_envoyer ») et (« P3_cases_libres », « P_produit_délivré ») forme chacun des composantes conservatives positives. Le nombre de jetons contenus dans ces places est donc borné, et cette borne est donnée par le marquage initial :

- le nombre maximum de jetons dans P_ordres est k1
- le nombre maximum de jetons dans P_produit_prêt_à_envoyer est k2
- le nombre maximum de jetons dans P_produit_délivré est k3

Question 1.2. Modélisation d'un atelier de fabrication

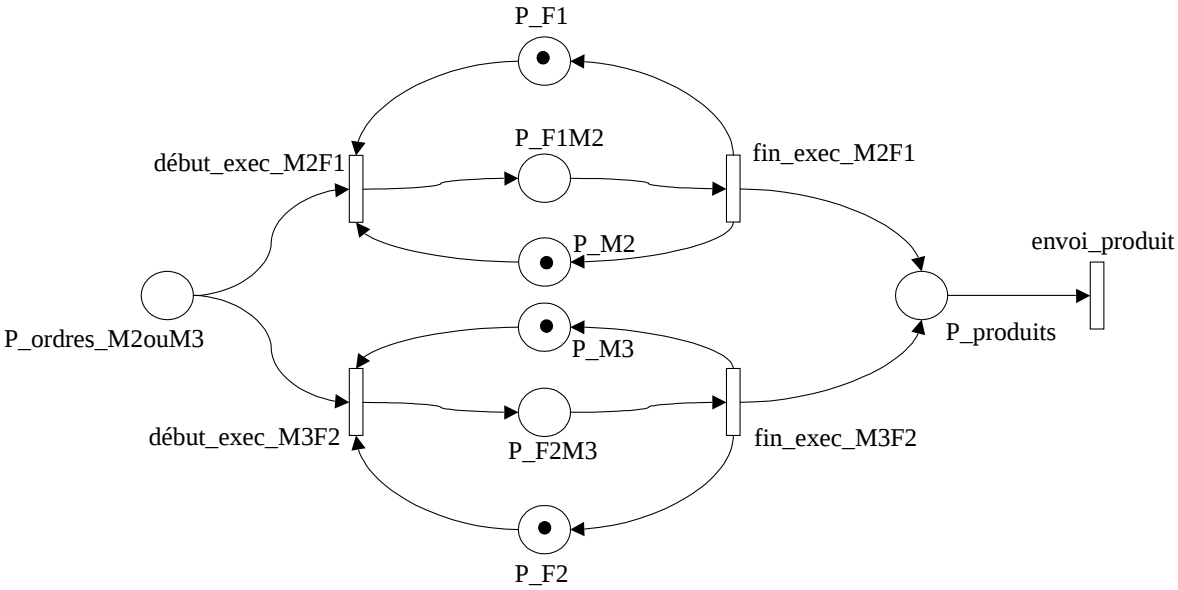
On suppose que les machines sont maintenant atomiques. Nous ne modéliserons donc plus à ce niveau le fonctionnement interne de chaque machine comme dans la question précédente, mais nous nous concentrerons en revanche sur le fonctionnement global de l'atelier.

La première étape de l'atelier est composée de la machine M1 avec les deux opérateurs F1 et F2. A ce niveau, M1, F1 et F2 peuvent être modélisés comme des sémaphores, c'est-à-dire des ressources libres ou utilisées. Cette étape peut être modélisée par le RdP suivant :



L'envoi d'un ordre provoque la production d'un jeton dans la place P_ordres_M1 (notons que là encore nous avons fait le choix d'une communication asynchrone entre l'atelier et l'acteur ordonnateur externe). Ensuite, si la machine M1 est libre (un jeton dans P_M1) et si l'opérateur F1 (resp. F2) est libre (un jeton dans P_F1 (resp. dans P_F2)), alors la transition début_exec_M1F1 est franchissable, ce qui conduit à occuper M1 et F1 (resp. F2) (on retire le jeton dans P_M1 et P_F1 (resp. P_F2)), et produire un jeton dans P_M1F1 (resp. P_M1F2). En fin d'exécution, on rend à nouveau disponible la machine et l'opérateur en remettant un jeton dans les places respectives, puis on produit un ordre vers la seconde étape de l'atelier (un jeton dans P_ordres_M2ouM3).

La seconde étape est à peu près similaire à la seconde, à ceci près qu'elle met en jeu deux machines M2 (opérateur F1) et M3 (opérateur F3). La encore F1, F2, M2 et M3 sont vus comme des sémaphores :



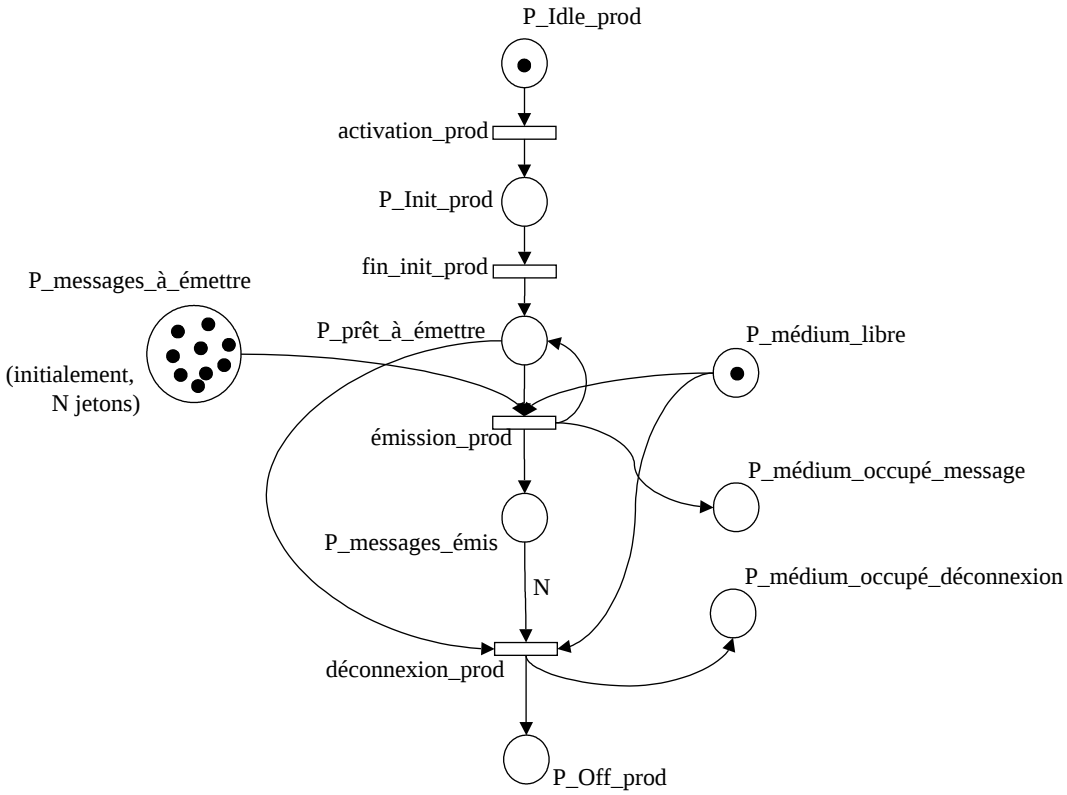
Il est clair que les places « P_ordres_M1 », « P_ordres_M2ouM3 » et « P_produits » ne sont pas bornées. Par corriger ce problème on applique la même méthode que dans la question précédente.

Question 2. Protocole Producteur - Consommateur

Question 2.1. Médium = buffer à une case

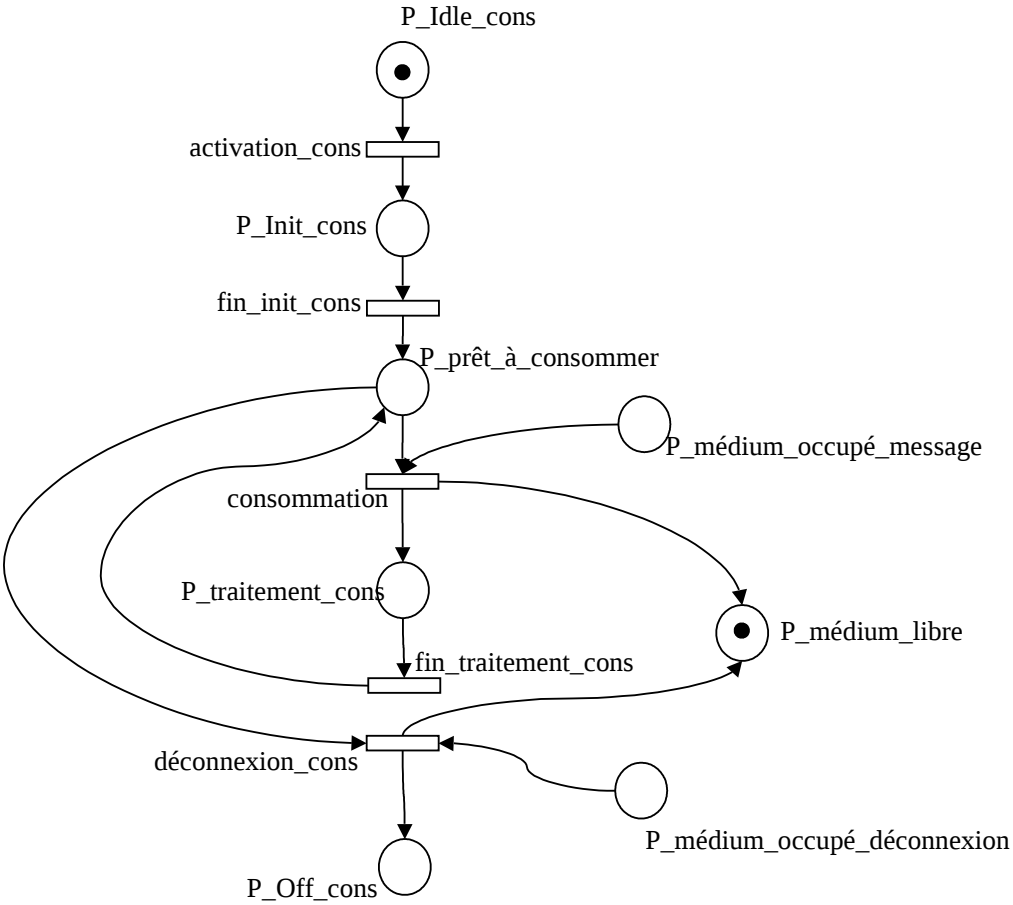
On modélise séparément le producteur et le consommateur et fait fait l'hypothèse (naturelle) que le médium agit comme un buffer assurant une communication asynchrone entre le producteur et le consommateur.

Modèle du producteur :



Le producteur, selon ce modèle, se comporte tout d'abord comme une séquence d'action (activation_prod, puis fin_init_prod) pour arriver ensuite dans un état où il est prêt à émettre. Il peut alors émettre si le médium est libre (un jeton dans P_médium_libre), et s'il a encore un message à émettre. Notons que la place P_messages_à_émettre contient autant de jeton que de messages à émettre, soit N jetons. Notons que nous ne modélisons pas explicitement les messages, mais uniquement le fait qu'un message soit être émis ou a déjà été émis. Après chaque émission, on produit un jeton dans la place P_message_émis de manière à compter le nombre de message produits, puis le processus revient dans l'état prêt à émettre puis recommence. Lorsque le nombre de messages émis est égal à N, c'est-à-dire lorsque tous les messages ont été émis, alors le processus émet un message de déconnexion (si le médium est libre bien entendu), puis s'arrête (arrivée dans la place P_Off_prod).

Modèle du consommateur :

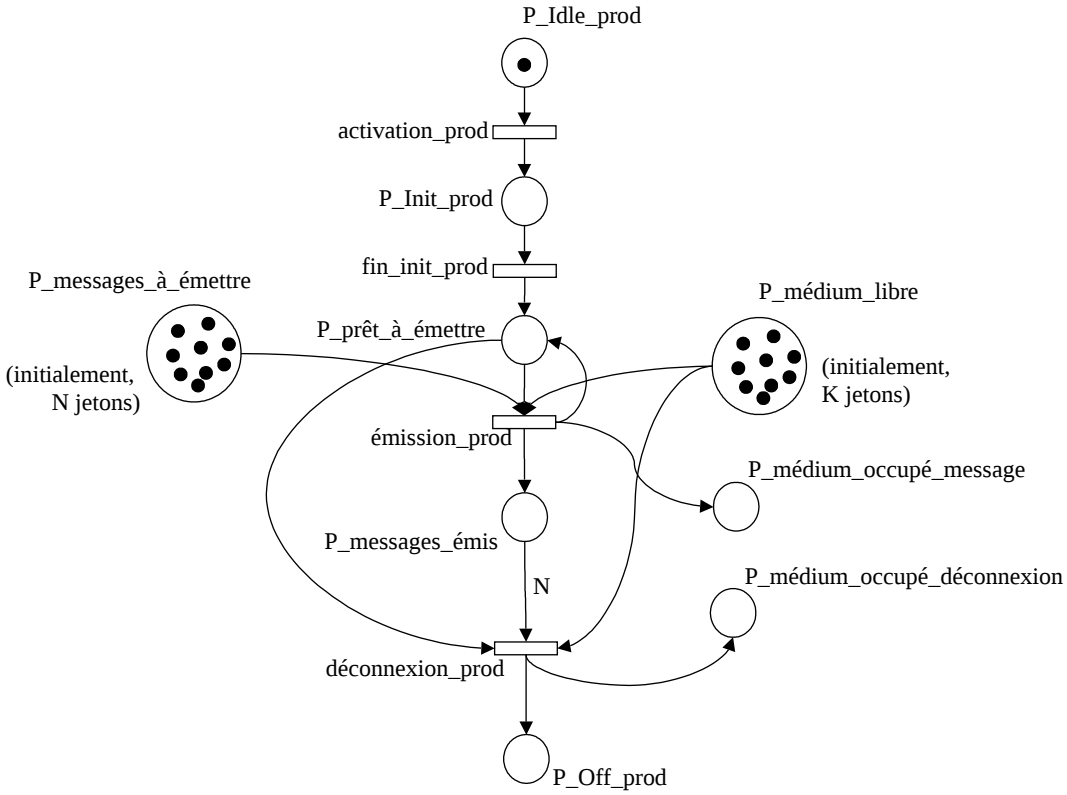


La composition des deux modèles est obtenue par fusion des places de même nom. Dans le modèle global ainsi construit, la synchronisation « lâche » entre le producteur et le consommateur se fait par les places « P_médium… ». Le producteur ne peut émettre que si le médium est libre, y compris un message de déconnexion, et le consommateur ne peut consommer que si le médium est occupé, y compris par un message de déconnexion. Le médium ne contenant qu'une case, on peut être certain que le message de déconnexion n'arrivera qu'une fois que les messages de données auront été consommés par le consommateur. Dès que le consommateur reçoit un message de déconnexion, il peut donc commencer sa procédure de déconnexion.

Question 2.2. Médium = buffer à K cases

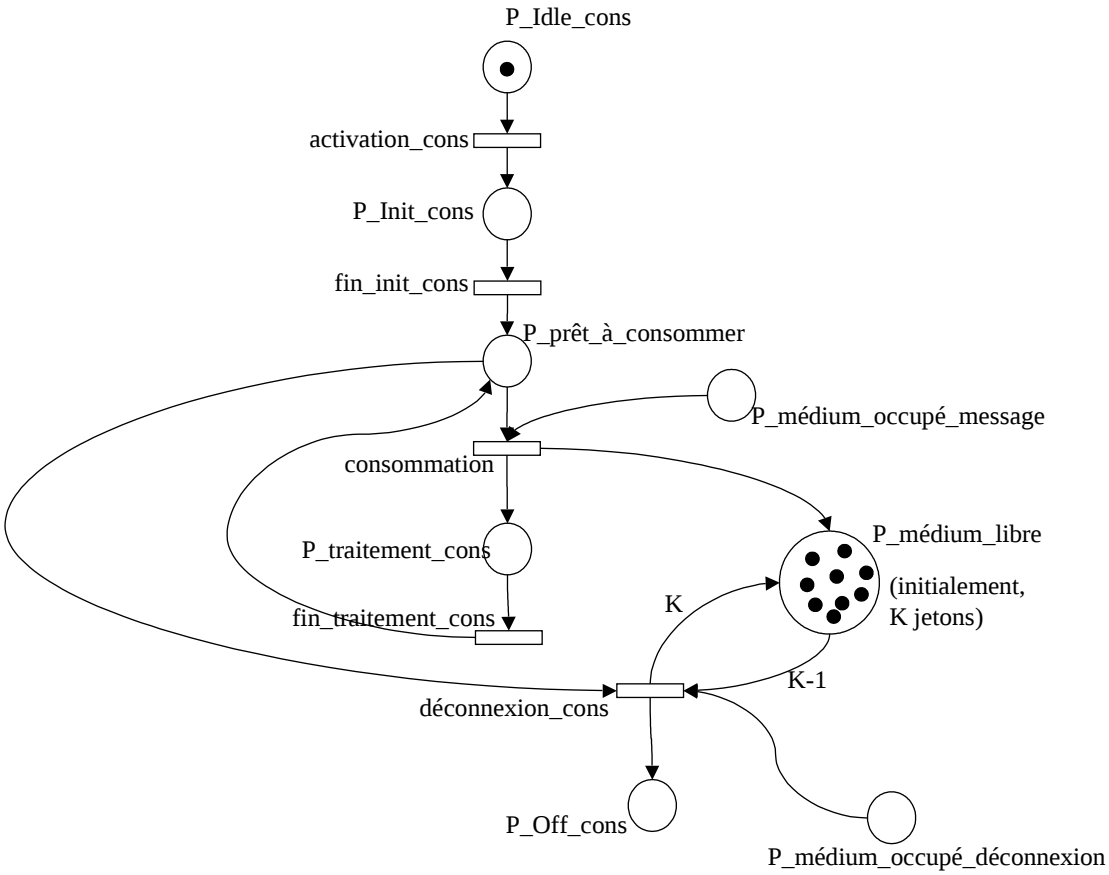
Modèle du producteur :

Le modèle du producteur reste sans changement, mis à part le nombre de jeton dans la place P_médium_libre qui passe de 1 à K. Chaque jeton dans cette place représente ainsi une case libre dans le médium. Chaque jeton dans la place P_médium_occupé_message représentera alors un message en transit dans le médium (il peut y en avoir simultanément K).



Modèle du consommateur :

En revanche, le modèle du consommateur est légèrement différent. Parmi les messages en transit dans le médium peut figurer un message de déconnexion. Aucune hypothèse n'étant fait sur le médium, il se peut que ce message transite sur le médium en même temps que des messages de données (bien qu'il ait été émis après) puis double ces deniers. Le consommateur devra donc s'assurer, avant de consommer le message de déconnexion, qu'il a consommer tous les messages de données, c'est-à-dire qu'il a vidé le médium de ces deniers. Pour ce faire, ne pouvant tester que la place P_médium_occupé_message est vide, on testera que la place P_médium_libre contient K-1 cases libres (une place étant occupée par le message de déconnexion).



Là encore le modèle global est obtenu par fusion des places de même nom. Dans le modèle global ainsi construit, la synchronisation « lâche » entre le producteur et le consommateur se fait par les places « P_médium… ». Le producteur ne peut émettre que si le médium contient au moins une place libre (au moins un jeton dans « P_médium_libre »), y compris un message de déconnexion, et le consommateur ne peut consommer que si le médium contient au moins un message (au moins un jeton dans « P_médium_occupé… »), y compris un message de déconnexion. Le médium contenant plusieurs cases, on ne peut plus être certain que le message de déconnexion arrivera après que les messages de données aient été consommés. Dès lors, lorsque le consommateur reçoit un message de déconnexion, il ne peut commencer sa procédure de déconnexion que si le médium est entièrement vide à l'exception du message de déconnexion (c'est-à-dire contient K-1 cases libres).

Question 3. Un service d'établissement de connexion

Question 3.1.

L'entité appelante se considère connectée dès qu'elle a envoyé CR ; l'entité appelée est connectée dès qu'elle a reçue CR. De même, l'entité appelante se considère déconnectée dès qu'elle a envoyé DR ; l'entité appelée est connectée dès qu'elle a reçue DR.

Selon ce protocole, il n'y a pas de synchronisation entre l'entité appelante et l'entité appelée. Le médium met en œuvre une communication asynchrone. Ce médium sera modélisé par une place dans laquelle l'entité appelante placera un jeton lorsqu'il émettra un (N)PDU, qui sera consommé ensuite par l'entité appelée.

Ce protocole peut être modélisé par le RdP suivant (protocole monodirectionnel, figure 3.1).

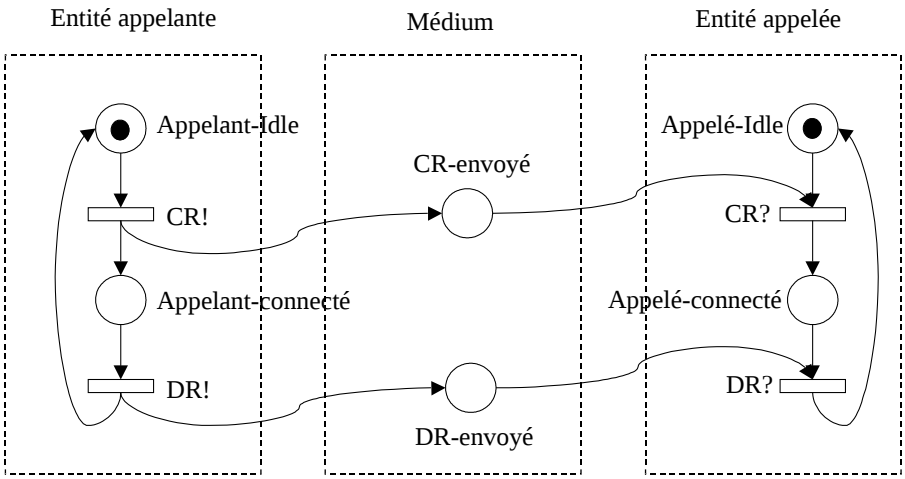


figure 3.1 : protocole monodirectionnel

Malheureusement, ce modèle est non borné. Les places CR-envoyé et DR-envoyé peuvent accueillir un nombre quelconque non borné de jeton. Cela traduit en fait une carence au sein du protocole qui est l'absence de synchronisation entre l'appelant et l'appelé. Ce protocole est donc faux.

Une correction possible peut consister en l'ajout d'un mécanisme d'acquittement. Chaque demande de connexion et de déconnexion doit être acquittée avant d'être considérée comme effective. Dans ce cas, l'appelant doit attendre l'acquittement avant de poursuivre son déroulement. Ce protocole corrigé peut être modélisé par le RdP figure 3.2 (protocole monodirectionnel corrigé).

figure 3.2 : protocole monodirectionnel corrigé

Ce réseau est borné. Ce résultat peut être obtenu en montrant que ce RdP contient trois composantes conservatives positives qui le recouvrent entièrement (elles correspondent aux trois cycles dans le RdP). Ces composantes sont :

- {Appelant-Idle, Appelant_attente1, Appelant-connecté, Appelant_attente2}
- {Appelé-Idle, Appelé_trait1, Appelé-connecté, Appelé_trait2}
- {Appelant-Idle, CR-envoyé, Appelé_trait1, Ack-CR-envoyé, Appelant-connecté, DR-envoyé, Appelé_trait2, Ack-DR-envoyé}

Les entités sont maintenant correctement synchronisées.

Question 3.2.

On complète maintenant le protocole pour que les deux entités puissent être à l'origine de la demande de connexion. Elles sont donc maintenant symétriques.

L'opération de connexion et de déconnexion étant similaires, on ne traitera que la première.

Une première solution pourrait consister en la généralisation du modèle précédent. Dans chaque entité, on modélise une branche demandant la connexion, et une l'attendant (figure 3.3 protocole bidirectionnel).

figure 3.3 : protocole bidirectionnel

Selon ce modèle, chaque entité peut demander la connexion puis se synchronise avec l'autre entité sur l'attente de l'acquittement de connexion.

Toutefois, ce modèle présente une situation de blocage. Cette situation survient lorsque les deux entités demandent la connexion en même temps. Dans ce cas, A franchit la transition A-CR! puis attend un jeton d'acquittement. Dans le même temps B franchit la transition B-CR! puis attend également un jeton d'acquittement. Chaque entité se retrouve en attente d'un acquittement et ne peut donc plus recevoir la demande de connexion émise, et a fortiori l'acquitter. Il s'agit d'une situation de deadlock du protocole, révélée par une situation de blocage du modèle RdP.

On peut corriger ce protocole par un mécanisme de « poignée de main ». En cas de demande de connexion simultanée, chaque entité considèrera la demande de l'autre entité comme un acquittement de sa propre demande, et donc passera dans le mode connecté. Cette correction peut être modélisée par le RdP figure 3.4 (protocole bidirectionnel corrigé). Sur cette figure, la correction apportée consiste en l'ajout de deux transtions (une dans chaque entité). Ces ajouts sont dessinés en trait fort.

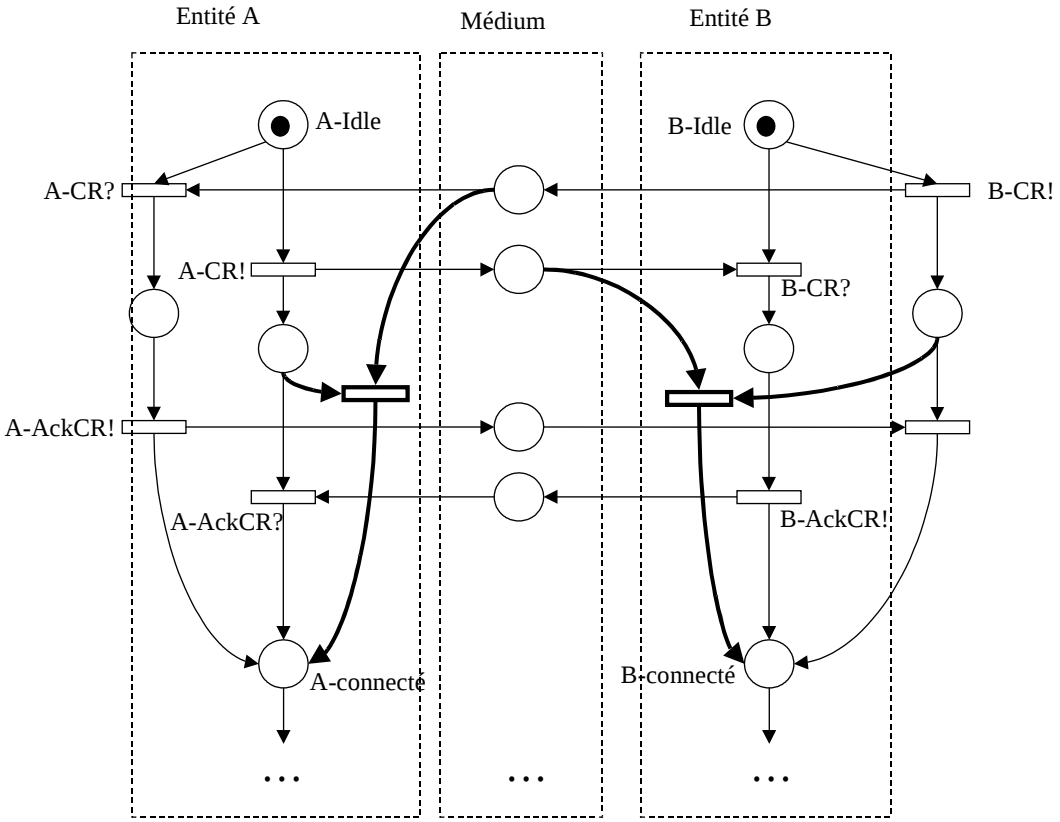


figure 3.4 : protocole bidirectionnel corrigé