Vérification et Ordonnancement Temps Réel Sous Contraintes d'Énergie

Yasmina Abdeddaïm

ESIEE Paris, Département Systèmes Embarqués

17 janvier 2011

Motivation

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40)$$

Ordonnançable avec EDF et RM.

Motivation

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 1)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

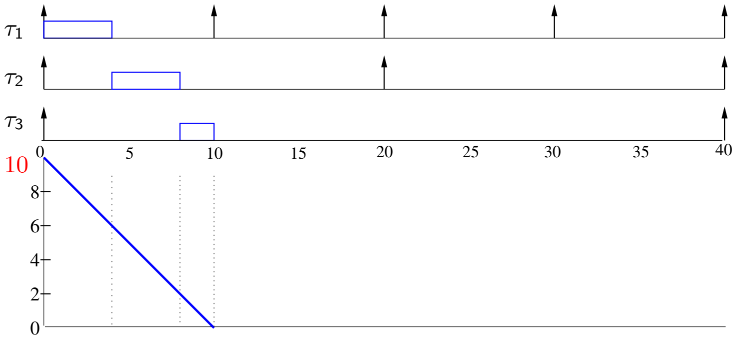
Ordonnançable avec EDF ?
Une batterie: capacité max 10. Taux de chargement/ unité temps $= 2$.

Motivation

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 1)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

Ordonnançable avec EDF ?

Une batterie: capacité max 10. Taux de chargement/ unité temps = 2.

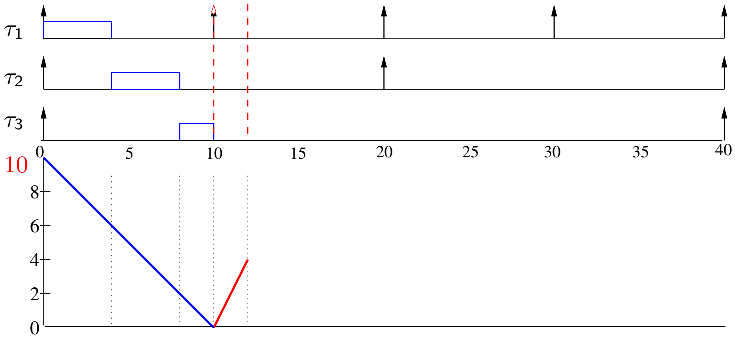


Motivation

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 1)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

Ordonnançable avec EDF ?

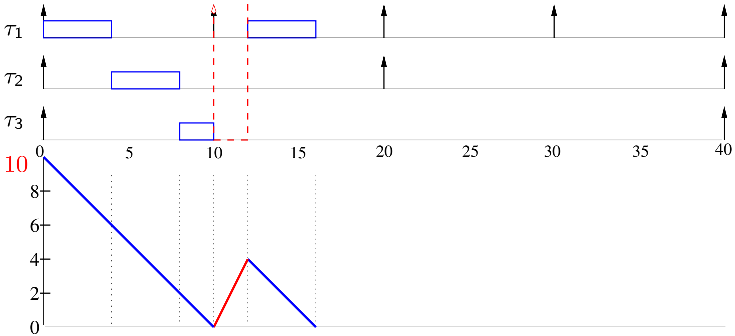
Une batterie: capacité max 10. Taux de chargement/ unité temps = 2.



Motivation

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 1)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

Ordonnançable avec EDF ?
Une batterie: capacité max 10. Taux de chargement/ unité temps = 2.

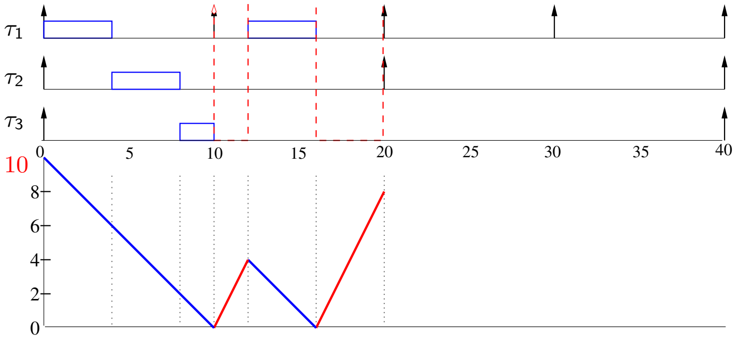


Motivation

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 1)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

Ordonnançable avec EDF ?

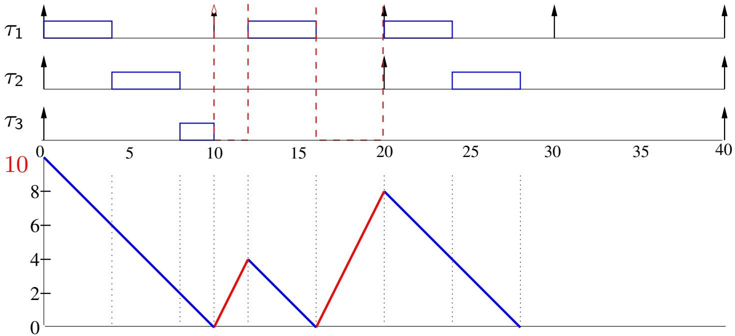
Une batterie: capacité max 10. Taux de chargement/ unité temps = 2.



Motivation

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 1)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

Ordonnançable avec EDF ?
Une batterie: capacité max 10. Taux de chargement/ unité temps = 2.

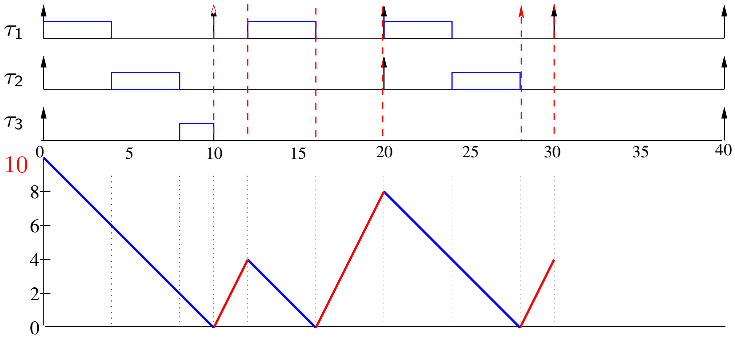


Motivation

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 1)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

Ordonnançable avec EDF ?

Une batterie: capacité max 10. Taux de chargement/ unité temps = 2.

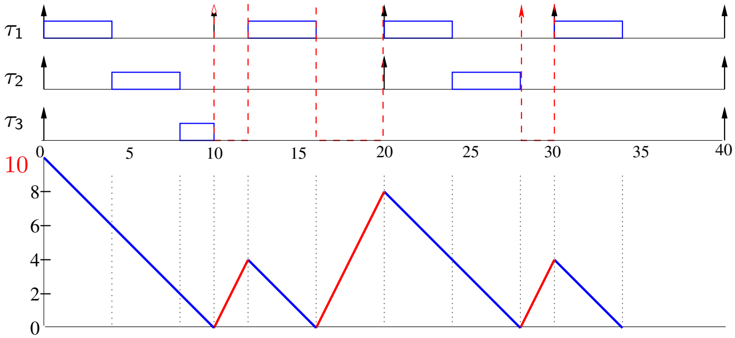


Motivation

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 1)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

Ordonnançable avec EDF ?

Une batterie: capacité max 10. Taux de chargement/ unité temps = 2.

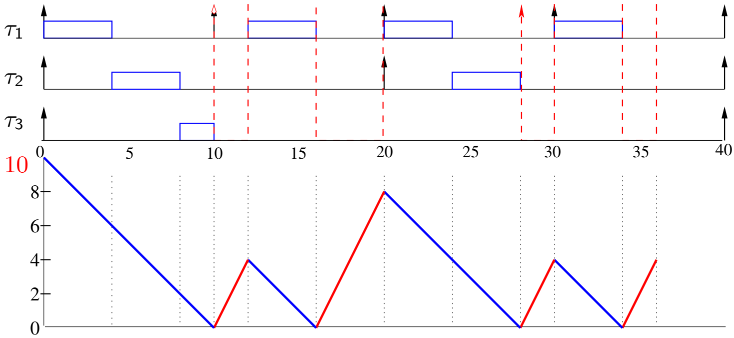


Motivation

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 1)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

Ordonnançable avec EDF ?

Une batterie: capacité max 10. Taux de chargement/ unité temps = 2.

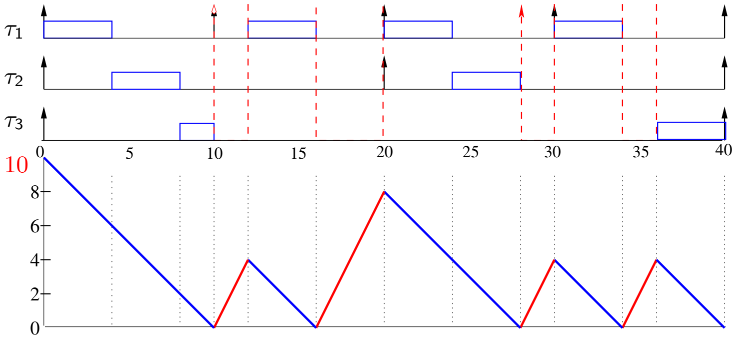


Motivation

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 1)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

Ordonnançable avec EDF ?

Une batterie: capacité max 10. Taux de chargement/ unité temps = 2.



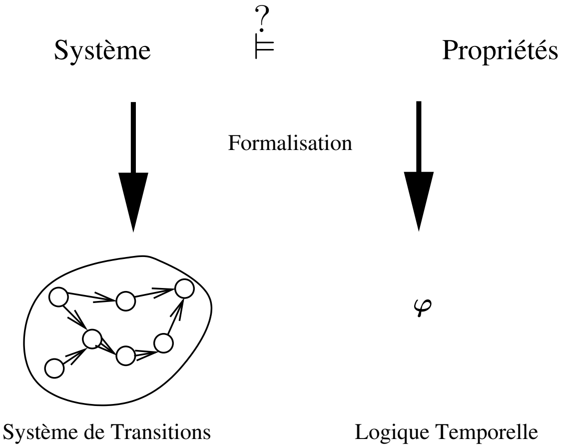
Plan

Plan

Model Checking

Etant donnés S (modèle du système) et Φ (propriété à satisfaire), est-ce que $S \models \Phi$?

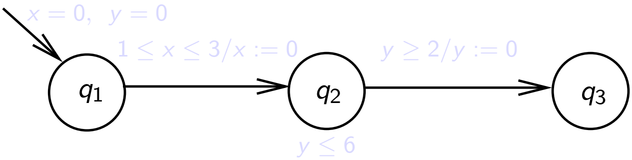
Permet la découverte des bugs au plus tôt dans cycle développement



Propriétés à Vérifier sur Systèmes Réactifs

- Accessibilité
  Une certaine situation peut être atteinte
- Sûreté
  Quelque chose de mauvais n'arrive jamais
- Vivacité
  Quelque chose de bon finit par arriver
- Équité
  Quelque chose de bon se répète infiniment
- Absence de blocage
  Le système ne se trouve jamais dans un état qu'il ne peut plus quitter

Automates Temporisés

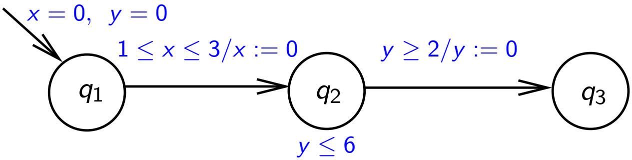


Automate Temporisé = Automate + horloges

Défini en 1991 par Alur et Dill [1]

1. Horloges: x et y,
2. Gardes: $1 \leq x \leq 3$ et $y \geq 2$,
3. Remises à Zéro: $x := 0$ et $y := 0$,
4. Invariant: $y \leq 6$.

Automates Temporisés



Automate Temporisé = Automate + horloges

Défini en 1991 par Alur et Dill [1]

1. Horloges: x et y,
2. Gardes: $1 \leq x \leq 3$ et $y \geq 2$,
3. Remises à Zéro: $x := 0$ et $y := 0$,
4. Invariant: $y \leq 6$.

Contraintes d'Horloges

Pour un ensemble $\mathcal{X}$ d'horloges, l'ensemble $\Phi(\mathcal{X})$ de contraintes d'horloges est défini par la grammaire suivante:

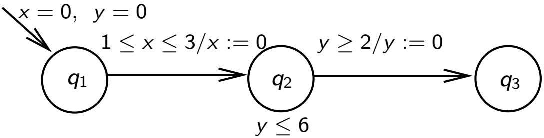
$$\phi := x \leq c | c \leq x | x < c | c < x | \phi_1 \wedge \phi_2,$$

avec x est une horloge de $\mathcal{X}$ et c est une constante de $\mathbb{Q}$.

Transitions

- Transition discrète: $(q, \mathbf{v}) \xrightarrow{a} (q', \mathbf{v}')$ t.q. $\delta = (q, a, \phi, \lambda, q') \in \Delta$, $\mathbf{v}$ satisfait ϕ, $\mathbf{v}' = \mathbf{v}[\lambda := 0]$ et $\mathbf{v}'$ satisfait $Inv(q')$

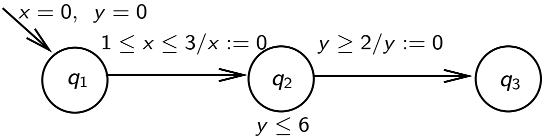
- Transition temporelle: $(q, \mathbf{v}) \xrightarrow{t} (q, \mathbf{v} + t\mathbf{1})$, $t \in \mathbb{R}_+$ t.q. $(\mathbf{v} + t\mathbf{1})$ satisfait $Inv(q)$



Exécutions

- Une exécution à partir de $(q_0, \mathbf{v}_0)$ est une séquence finie de transitions

$$\xi : \quad (q_0, \mathbf{v}_0) \xrightarrow{t_1} (q_1, \mathbf{v}_1) \xrightarrow{t_2} \cdots \xrightarrow{t_n} (q_n, \mathbf{v}_n).$$



$$\xi_1 : \quad (q_1, 0, 0) \xrightarrow{2} (q_1, 2, 2) \xrightarrow{0} (q_2, 0, 2) \xrightarrow{3} (q_2, 3, 5) \xrightarrow{0} (q_3, 3, 0)$$

$$\xi_2 : \quad (q_1, 0, 0) \xrightarrow{1.5} (q_1, 1.5, 1.5) \xrightarrow{0} (q_2, 0, 1.5) \xrightarrow{2} (q_2, 2, 3.5) \xrightarrow{0} (q_3, 2, 0)$$

Accessibilité dans les Automates Temporisés

Théorème Alur et Dill [2, 1]

Le problème d'accessibilité dans les automates temporisé est décidable.

Procédure de Décision

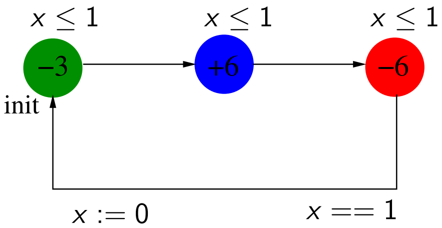
1. Construire un automate non temporisé R tel que:
   s accessible dans automate temporisé $\Leftrightarrow$ s accessible dans R
2. Test de l'accessibilité dans R

Depuis ce résultat, plusieurs outils de Model Checking temporisé: Kronos, Uppaal
...

Modélisation des Ressources dans Systèmes Temporisés

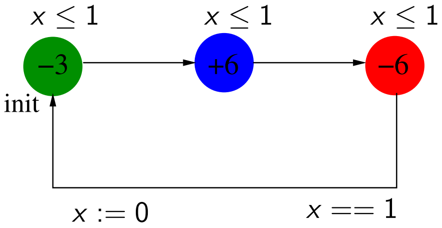
1. Prise en compte dans le modèle du système à vérifier de
   - la bande passante,
   - la mémoire consommée,
   - le coût,
   - la consommation d'énergie,
   - ...
2. Une solution: Utiliser les automates hybrides, mais le problème d'accessibilité est indécidable.
3. Prendre en compte la consommation et production d'énergie dans les états de l'automate.

Accessibilité sous Contraintes d'Énergie

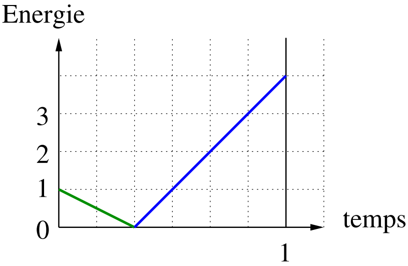


- -6 et -3 indique le taux de consommation d'énergie.
- $+6$ indique le taux de chargement en énergie.
- Étant donné une énergie initiale, existe-t-il une exécution infinie où l'énergie n'est jamais inférieure et/ou supérieure à une certaine borne ?

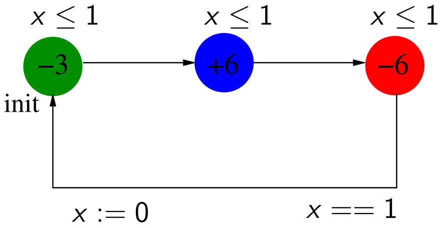
Accessibilité sous Contraintes d'Énergie



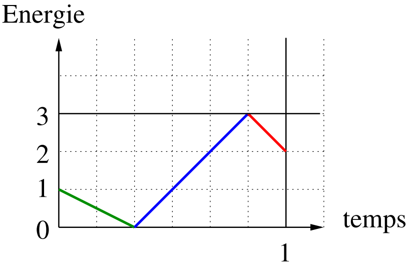
- Énergie initiale: 1.
- Problème borne inférieure (L): borne inf=0.



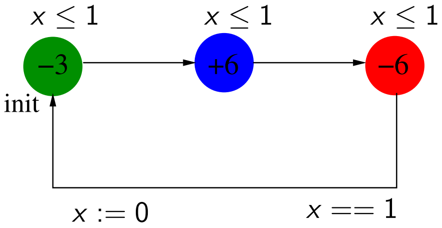
Accessibilité sous Contraintes d'Énergie



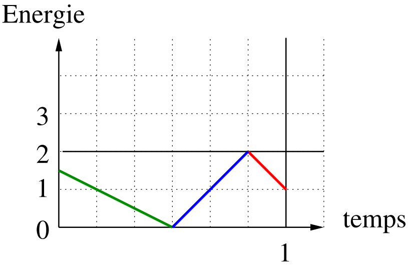
- Énergie initiale: 1.
- Problème borne inférieure et supérieure (L+W): borne inf =0, borne sup= 3.



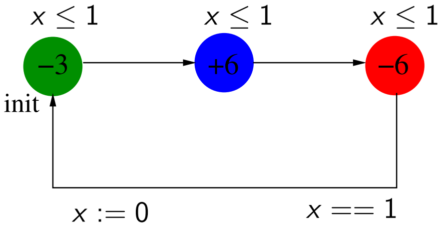
Accessibilité sous Contraintes d'Énergie



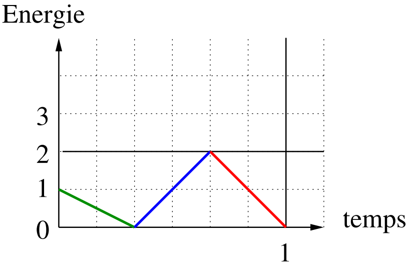
- Énergie initiale: 1,5.
- Problème borne inférieure et supérieure (L+W): borne inf =0, borne sup= 2.



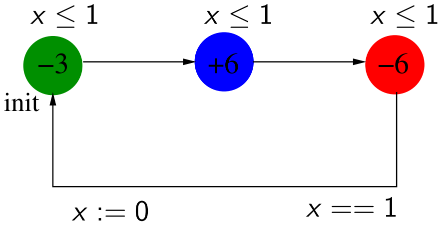
Accessibilité sous Contraintes d'Énergie



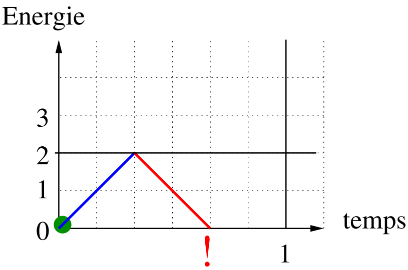
- Énergie initiale: 1,5.
- Problème borne inférieure et supérieure (L+W): borne inf =0, borne sup= 2.



Accessibilité sous Contraintes d'Énergie



- Énergie initiale: 1,5.
- Problème borne inférieure et supérieure (L+W): borne inf =0, borne sup= 2.



Accessibilité sous Contraintes d'Énergie

	1 horloge [3]	n horloges [4]
L	$\in P$	?
L + W	$\in P$	?

[3] P. Bouyer, U. Fahrenberg, K.G. Larsen, N. Markey,
Timed automata with observers under energy constraints, *HSCC* 2010.

[4] P. Bouyer, U. Fahrenberg, K.G. Larsen, N. Markey, J. Srba,
Infinite Runs in Weighted Timed Automata with Energy Constraints, *FORMATS* 2008.

Plan

Modèle de Tâches

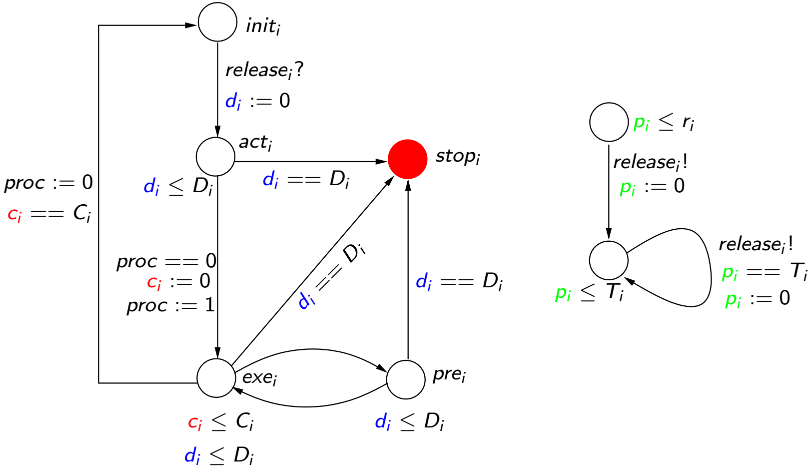
1. Un ensemble de tâches $\tau_i(r_i, C_i, T_i, D_i, e_i)$
   - r_i: date de réveil,
   - C_i: pire temps d'exécution,
   - T_i: période,
   - D_i: échéance relative ($D_i \leq T_i$),
   - e_i: taux de consommation d'énergie par unité de temps.

2. Une batterie $B(Emax, Bat, min, e1, e2)$
   - $Emax$: capacité maximale,
   - Bat: temps minimal pour le chargement à l'allumage,
   - $min, e_1, e2$: si la charge de la batterie est $\leq$ min, le taux de chargement par unité de temps est e_1 et le taux est e_2 sinon, avec $e_1 \geq e_2$.

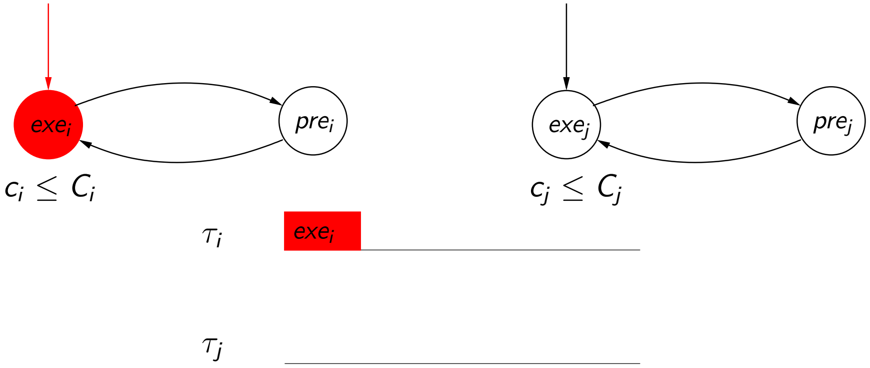
Notre Approche

1. Modéliser chaque tâche par un automate temporisé,
2. Modéliser la batterie par un automate temporisé,
3. Transformer le problème d'ordonnancement en un problème de vérification.

Automates Tâche $\tau_i(r_i, C_i, T_i, D_i)$

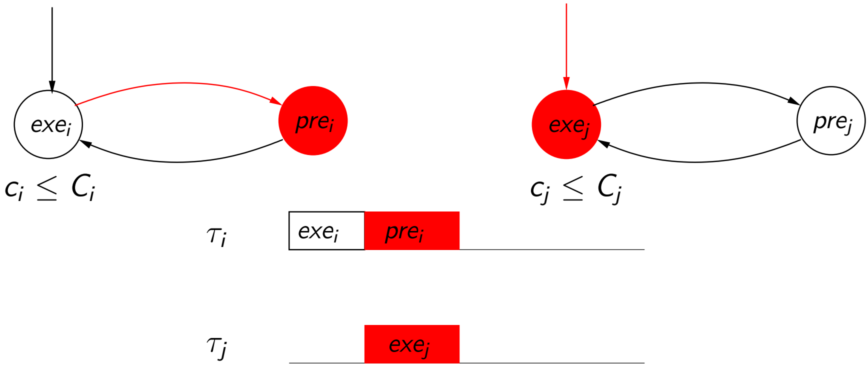


Préemption



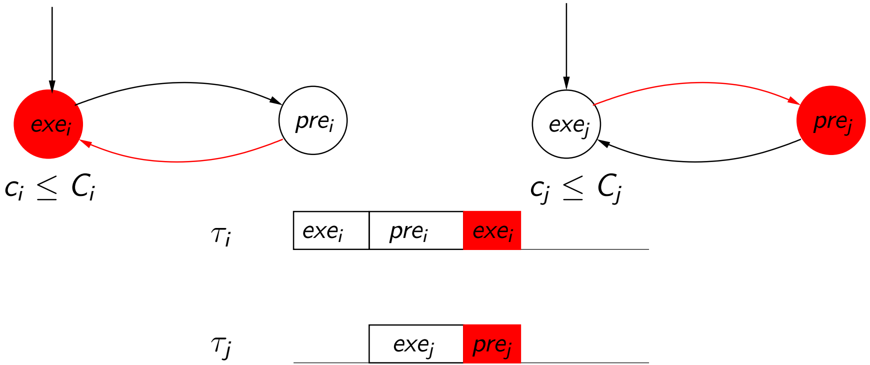
- Arrêter l'horloge = stopwatch automata: Accessibilité non décidable.
- Ajouter le temps de préemption p: Non connu à l'avance.

Préemption



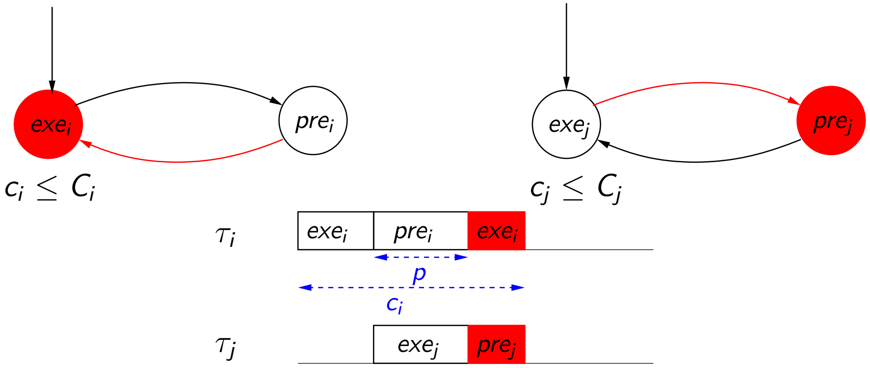
- Arrêter l'horloge = stopwatch automata: Accessibilité non décidable.
- Ajouter le temps de préemption p: Non connu à l'avance.

Préemption



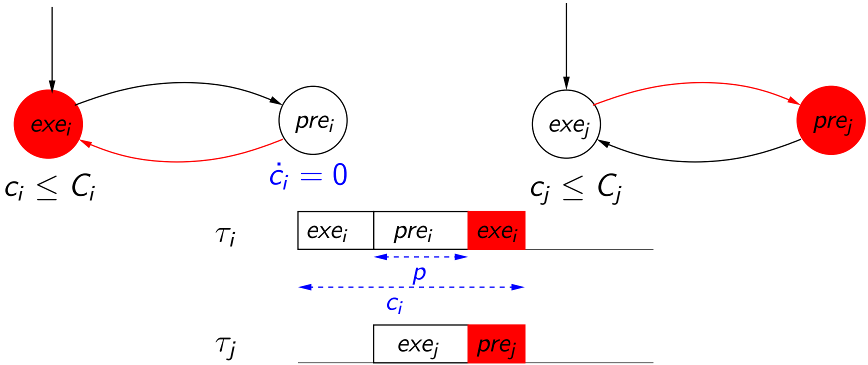
- Arrêter l'horloge = stopwatch automata: Accessibilité non décidable.
- Ajouter le temps de préemption p: Non connu à l'avance.

Préemption



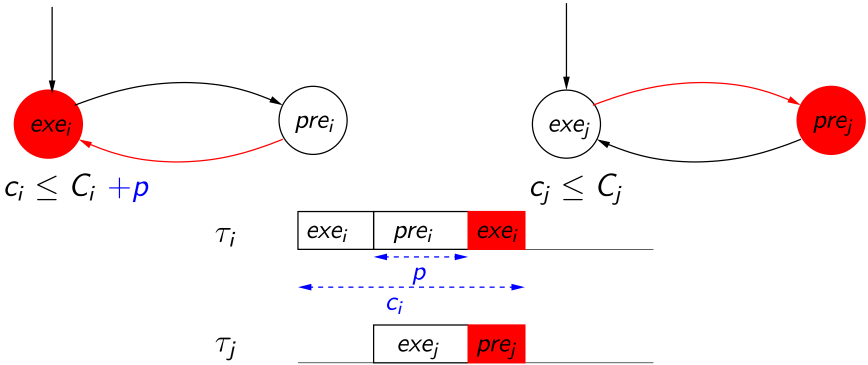
- Arrêter l'horloge = stopwatch automata: Accessibilité non décidable.
- Ajouter le temps de préemption p: Non connu à l'avance.

Préemption



- Arrêter l'horloge = stopwatch automata: Accessibilité non décidable.
- Ajouter le temps de préemption p: Non connu à l'avance.

Préemption



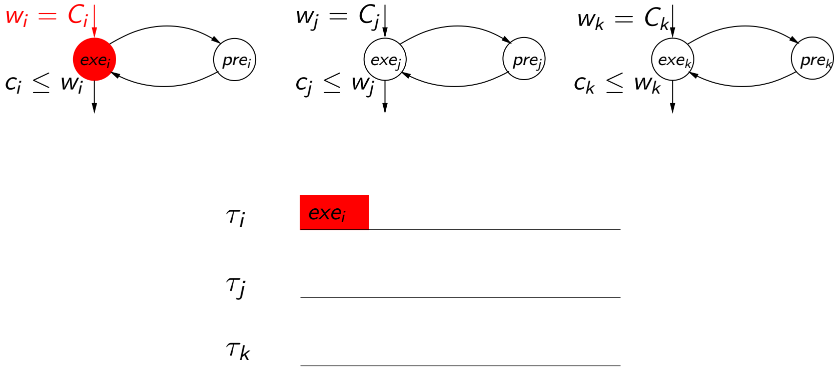
- Arrêter l'horloge = stopwatch automata: Accessibilité non décidable.
- Ajouter le temps de préemption p: Non connu à l'avance.

Restriction sur le Modèle

1. Priorité fixe par instance de tâche: si τ_i est préemptée par τ_j alors τ_i peut s'exécuter ssi τ_j a finie son exécution.
2. Le processeur peut rester inactif que si aucune tâche n'est en préemption.

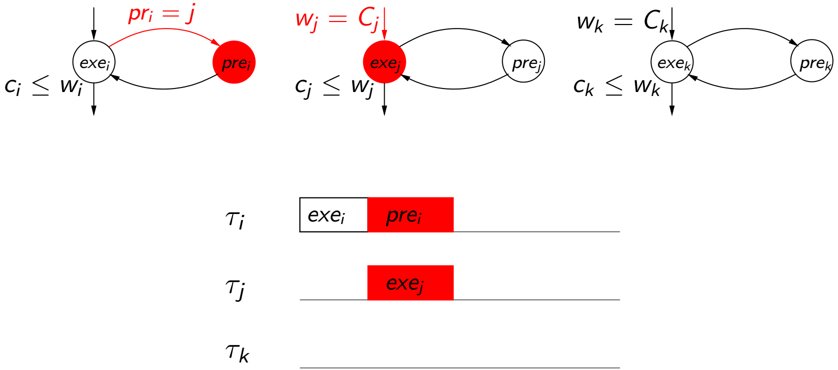
Restriction sur le Modèle

1. Priorité fixe par instance de tâche: si τ_i est préemptée par τ_j alors τ_i peut s'exécuter ssi τ_j a finie son exécution.
2. Le processeur peut rester inactif que si aucune tâche n'est en préemption.



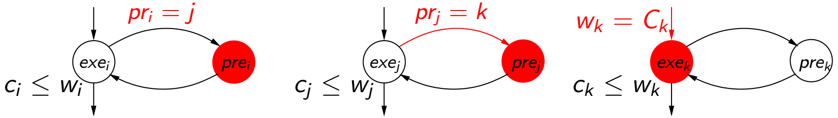
Restriction sur le Modèle

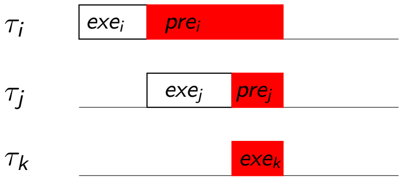
1. Priorité fixe par instance de tâche: si τ_i est préemptée par τ_j alors τ_i peut s'exécuter ssi τ_j a finie son exécution.
2. Le processeur peut rester inactif que si aucune tâche n'est en préemption.



Restriction sur le Modèle

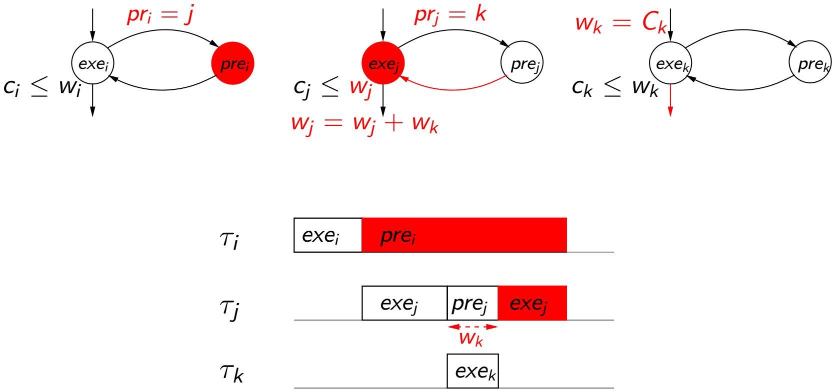
1. Priorité fixe par instance de tâche: si τ_i est préemptée par τ_j alors τ_i peut s'exécuter ssi τ_j a finie son exécution.
2. Le processeur peut rester inactif que si aucune tâche n'est en préemption.





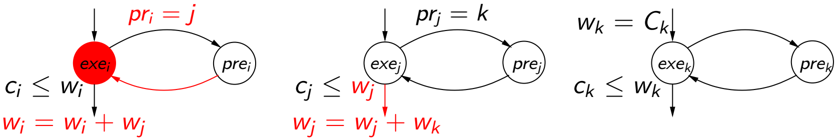
Restriction sur le Modèle

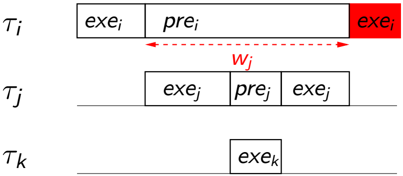
1. Priorité fixe par instance de tâche: si τ_i est préemptée par τ_j alors τ_i peut s'exécuter ssi τ_j a finie son exécution.
2. Le processeur peut rester inactif que si aucune tâche n'est en préemption.



Restriction sur le Modèle

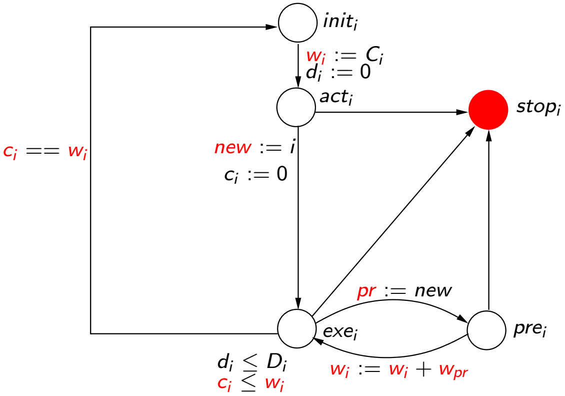
1. Priorité fixe par instance de tâche: si τ_i est préemptée par τ_j alors τ_i peut s'exécuter ssi τ_j a finie son exécution.
2. Le processeur peut rester inactif que si aucune tâche n'est en préemption.





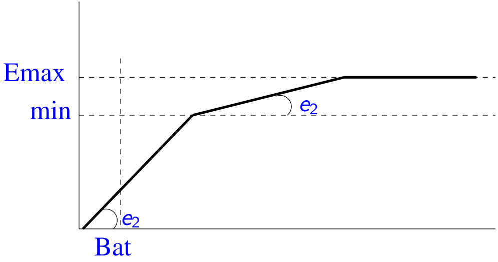
Automate Tâche $\tau_i(r_i, C_i, T_i, D_i)$

1. Priorité fixe par instance de tâche: si τ_i est préemptée par τ_j alors τ_i peut s'exécuter ssi τ_j a finie son exécution.
2. Le processeur ne peut être inactif que si aucune tâche n'est en préemption.



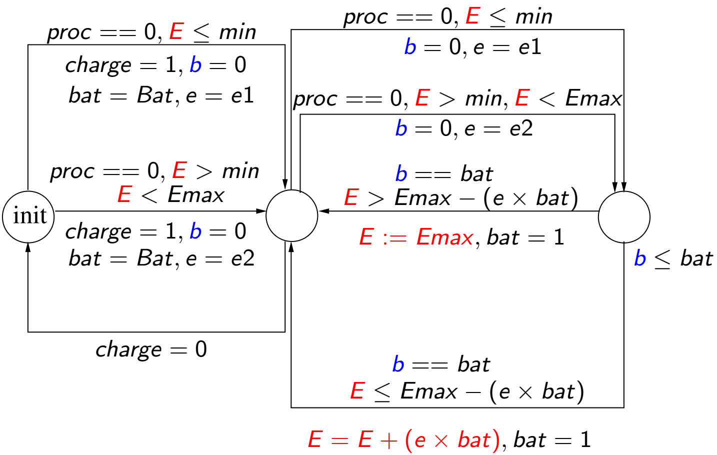
Batterie $B(Emax, Bat, min, e_1, e_2)$

- $Emax$: capacité maximale,
- Bat: temps minimal pour le chargement à l'allumage,
- $min, e_1, e2$: si la charge de la batterie est $\leq$ min, le taux de chargement par unité de temps est e_1 et le taux est e_2 sinon, avec $e_1 \geq e_2$.

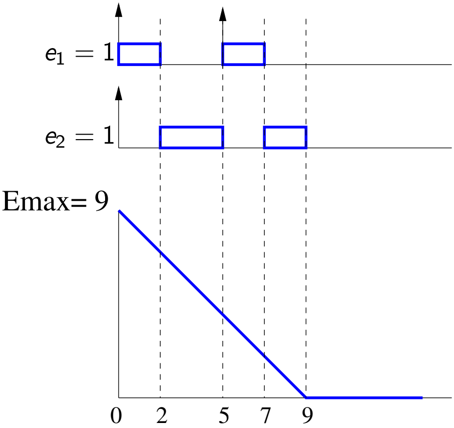


Automate Batterie $B(Emax, Bat, min, e_1, e_2)$

E mesure l'énergie disponible dans le système

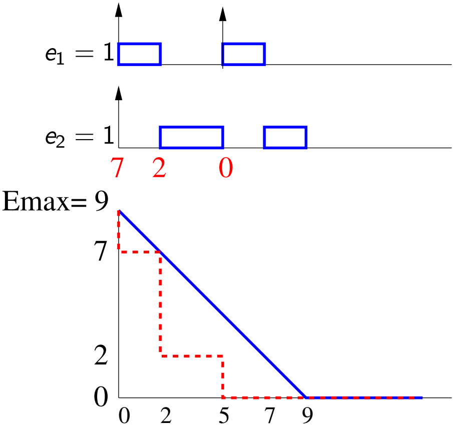


Tâche sous Contrainte d'Énergie $\tau_i(r_i, C_i, T_i, D_i, e_i)$



On considère que toute l'énergie est consommée au début de l'exécution de la tâche.

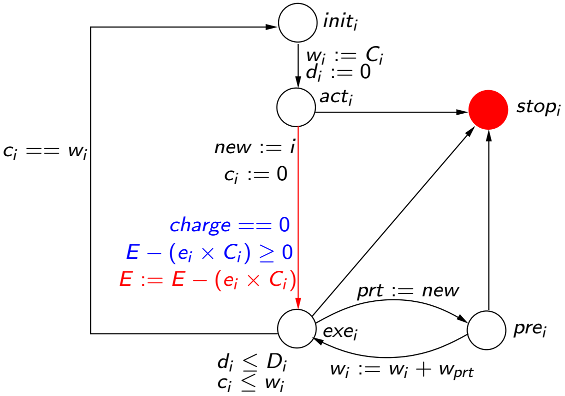
Tâche sous Contrainte d'Énergie $\tau_i(r_i, C_i, T_i, D_i, e_i)$



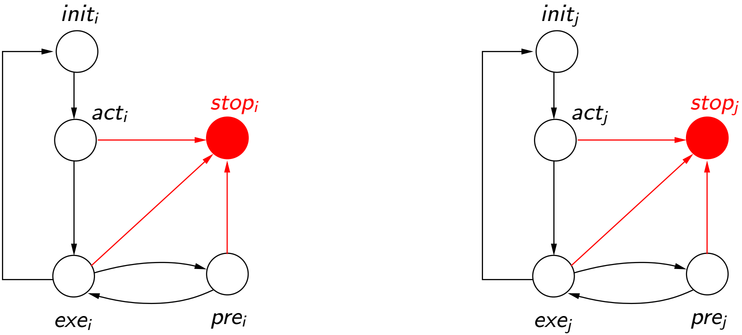
On considère que toute l'énergie est consommée au début de l'exécution de la tâche.

Tâche sous Contrainte d'Énergie $\tau_i(r_i, C_i, T_i, D_i, e_i)$

- On considère que toute l'énergie est consommée au début de l'exécution de la tâche.
- On ne charge pas si une tâche est en préemption.

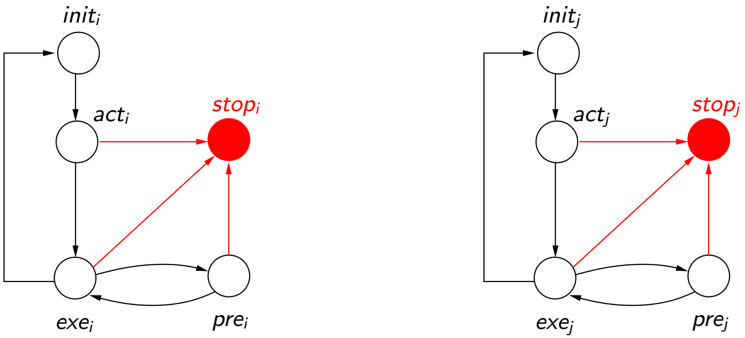


Test de Faisabilité



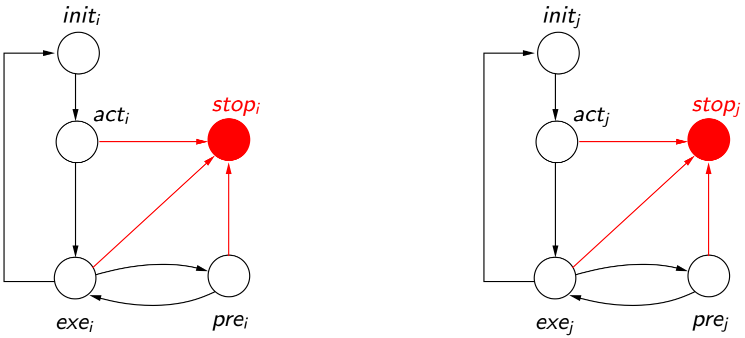
- Existe-t-il une exécution où aucun automate n'est dans l'état stop ?
- Propriété CTL: $EG\neg(\bigvee_{i\in[1,n]} stop_i)$.
- Si propriété vérifiée, générer un ordonnancement à partir de la trace faisable.

Test de Faisabilité



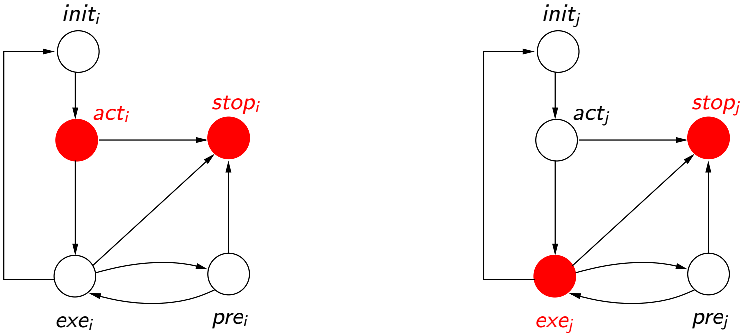
- Existe-t-il une exécution où aucun automate n'est dans l'état stop ?
- Propriété CTL: $EG\neg(\bigvee_{i\in[1,n]} stop_i)$.
- Si propriété vérifiée, générer un ordonnancement à partir de la trace faisable.

Test de Faisabilité



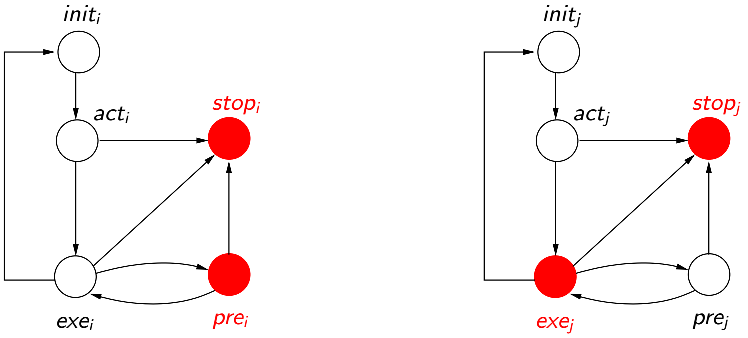
- Existe-t-il une exécution où aucun automate n'est dans l'état stop ?
- Propriété CTL: $EG\neg(\bigvee_{i\in[1,n]} stop_i)$.
- Si propriété vérifiée, générer un ordonnancement à partir de la trace faisable.

Priorité Fixe



- $\Sigma = \{\tau_1, \ldots, \tau_n\}, P(\tau_1) \leq \ldots \leq P(\tau_n)$
- Propriété CTL:
  $EG\neg(\bigvee_{i\in[1,n-1]}(act_i \bigwedge_{j\in[i,n]} exe_j) \bigvee_{i\in[1,n-1]}(pre_i \bigwedge_{j\in[j,n]} exe_j) \bigvee_{k\in[1,n]} stop_k)$

Priorité Fixe



- $\Sigma = \{\tau_1, \ldots, \tau_n\}, P(\tau_1) \leq \ldots \leq P(\tau_n)$
- Propriété CTL:
  $EG\neg(\bigvee_{i\in[1,n-1]}(act_i \bigwedge_{j\in[i,n]} exe_j) \bigvee_{i\in[1,n-1]}(pre_i \bigwedge_{j\in[j,n]} exe_j) \bigvee_{k\in[1,n]} stop_k)$

EDF

- La tâche la plus prioritaire est la tâche la plus proche de son échéance.
- Propriété CTL:

  $EG\neg(\bigvee_{i\in[1,n]}\bigvee_{j\neq i\in[1,n]}(act_i \wedge exe_j \wedge p_{ij})\bigvee_{i\in[1,n]}\bigvee_{j\neq i\in[1,n]}(pre_i \wedge exe_j \wedge p_{ij})$
  $\bigvee_{i\in[1,n]} stop_i)$

  p_{ij} l'état d'un automate observateur, accessible si $d_i - d_j > D_i - D_j$, avec d_i and d_j horloges d'échéances des tâches τ^i et τ^j.

Expérimentations Uppaal

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 1)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

- Non EDF et RM pour une batterie avec: capacité max $= 18$. Taux de chargement/ unité temps $= 2$.
- Non EDF et RM pour une batterie avec: capacité max $= 18$. Taux de chargement/ unité temps $= 3$.
- Il existe un ordonnancement faisable pour une batterie avec: capacité max $= 18$. Taux de chargement/ unité temps $= 3$.

Expérimentations Uppaal

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 1)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

- Non EDF et RM pour une batterie avec: capacité max = 18. Taux de chargement/ unité temps = 2.
- Non EDF et RM pour une batterie avec: capacité max = 18. Taux de chargement/ unité temps = 3.
- Il existe un ordonnancement faisable pour une batterie avec: capacité max = 18. Taux de chargement/ unité temps = 3.

Expérimentations Uppaal

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 1)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

- Non EDF et RM pour une batterie avec: capacité max = 18. Taux de chargement/ unité temps = 2.
- Non EDF et RM pour une batterie avec: capacité max = 18. Taux de chargement/ unité temps = 3.
- Il existe un ordonnancement faisable pour une batterie avec: capacité max = 18. Taux de chargement/ unité temps = 3.

Expérimentations Uppaal

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 1)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

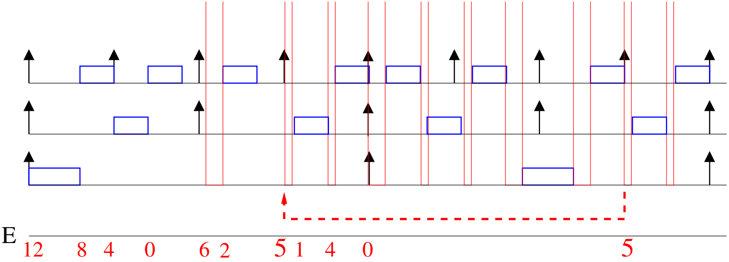
- Non EDF et RM pour une batterie avec: capacité max $= 18$. Taux de chargement/ unité temps $= 2$.
- Non EDF et RM pour une batterie avec: capacité max $= 18$. Taux de chargement/ unité temps $= 3$.
- Il existe un ordonnancement faisable pour une batterie avec: capacité max $= 18$. Taux de chargement/ unité temps $= 3$.

Ordonnancement faisable, Trace de Uppaal

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 1)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

Batterie: capacité max = 18. Taux de chargement/ unité temps = 3.

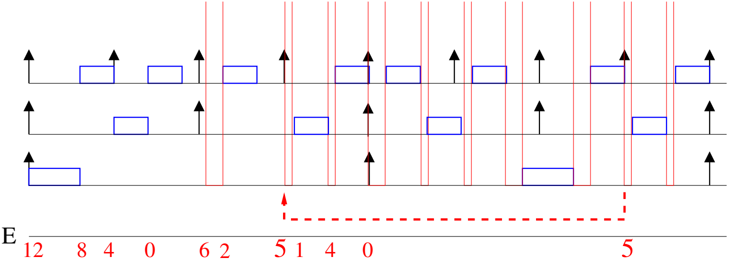
capacité max minimale = 6



Ordonnancement faisable, Trace de Uppaal

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 1)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

Batterie: capacité max = 18. Taux de chargement/ unité temps = 3.
capacité max minimale = 6

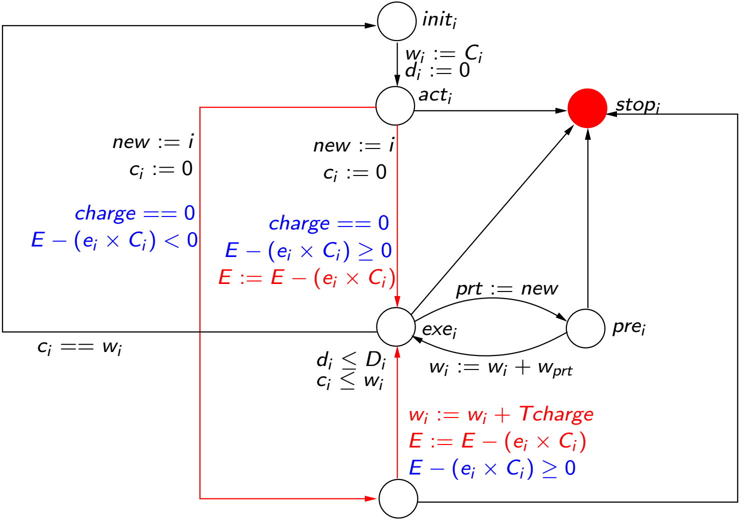


Exemple

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 1)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

Batterie: capacité max $= 18$. Taux de chargement/ unité temps $= 3$.
Ordonnançable avec EDF si chargement lors d'une préemption.

Nouveau Modèle



Expérimentations Uppaal

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 3)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

- Non EDF et RM pour batterie avec: capacité max $= 12$. Taux de chargement/ unité temps $= 7$.
- Il existe un ordonnancement faisable pour batterie avec: capacité max $= 12$. Taux de chargement/ unité temps $= 7$.
- Capacité max minimale $= 14$ pour EDF et taux de chargement/ unité temps $= 7$.

Expérimentations Uppaal

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 3)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

- Non EDF et RM pour batterie avec: capacité max = 12. Taux de chargement/ unité temps = 7.
- Il existe un ordonnancement faisable pour batterie avec: capacité max = 12. Taux de chargement/ unité temps = 7.
- Capacité max minimale = 14 pour EDF et taux de chargement/ unité temps = 7.

Expérimentations Uppaal

$$\tau_1 = (r_1 = 0, C_1 = 4, T_1 = 10, D_1 = 10, e_1 = 3)$$
$$\tau_2 = (r_2 = 0, C_2 = 4, T_2 = 20, D_2 = 20, e_2 = 1)$$
$$\tau_3 = (r_3 = 0, C_3 = 6, T_3 = 40, D_3 = 40, e_3 = 1)$$

- Non EDF et RM pour batterie avec: capacité max $= 12$. Taux de chargement/ unité temps $= 7$.
- Il existe un ordonnancement faisable pour batterie avec: capacité max $= 12$. Taux de chargement/ unité temps $= 7$.
- Capacité max minimale $= 14$ pour EDF et taux de chargement/ unité temps $= 7$.

Conclusions

1. Un modèle pour la consommation d'énergie en ordonnancement temps réel.
2. Tests de faisabilité et d'ordonnancabilité et génération de l'ordonnancement.
3. Trouver la capacité max minimale pour la faisabilité.
4. EDF n'est pas optimal dans ce modèle.
5. Questions:
   1. EDF optimal si même taux de consommation par tâche ?
   2. Faisable avec consommation d'énergie au début ssi faisable avec énergie consommée durant l'exécution ?

R. Alur and D. Dill.
A theory of timed automata.
Theoritical Computer Science, 2(126):183–235, 1994.

Rajeev Alur and David L. Dill.
Automata for modeling real-time systems.
In *ICALP'90*, pages 322–335, 1990.

Patricia Bouyer, Uli Fahrenberg, Kim G. Larsen, and Nicolas Markey.
Timed automata with observers under energy constraints.
In *HSCC*, pages 61–70, 2010.

Patricia Bouyer, Ulrich Fahrenberg, Kim Guldstrand Larsen, Nicolas Markey, and Jirí Srba.
Infinite runs in weighted timed automata with energy constraints.
In *FORMATS*, pages 33–47, 2008.