Analyses quantitatives de programmes

Séminaire LSV le 6 janvier 2009

Laure Gonnord

http://laure.gonnord.org/pro/

Verimag/CITI/INSA
Grenoble/Villeurbanne/Lyon, France

Systèmes embarqués

Plusieurs types de besoins :

- Programmes critiques : **vérification** du logiciel avant déploiement, propriétés de **sûreté**, **compilation**.
- Programmes « multimédia » : développement rapide, garanties de **Qualité de Service** (QoS) à l'exécution.

▶ ou une combinaison !

Plan

1. Vérification de propriétés numériques de sûreté de programmes synchrones par Analyse des Relations Linéaires, amélioration par accélération.
   - **Thèse** de l'UJF, Grenoble, laboratoire Vérimag soutenue en octobre 2007. Sous la direction de N. Halbwachs.
2. Expression et garanties à l'exécution de propriétés de Qualité de Service dans des systèmes à composants.
   - **Postdoc** ANR septembre 2007 - août 2008 ARA Sécurité, systèmes embarqués et intelligence ambiante, Projet REVE. En collaboration avec J.-P. Babau.
3. Compilation haut niveau de programmes pour systèmes sur puce.
   - **ATER** Lyon1/LIP-Compsys.

Vérification de propriétés de sûreté

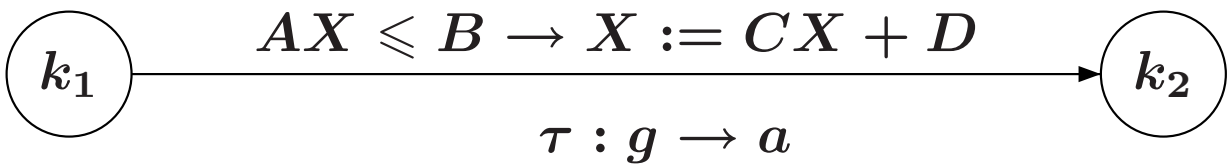
Les propriétés :

- Propriétés de **sûreté**.
- Propriétés numériques : **inéquations linéaires** $2y \leqslant 13$.

▶ Diverses méthodes : preuve, test, model-checking, **interprétation abstraite**.

Modèle - Notations

Vérification de propriétés **numériques** sur des GFC avec conditions et actions **affines** :

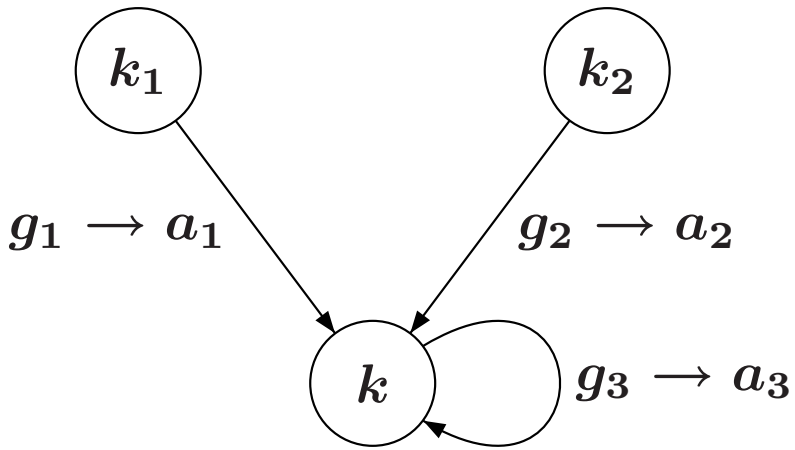


ou encore « automates interprétés », automates « à compteurs ».

- A, C matrices, B, D vecteurs.
- Sémantique « naturelle ».
- On veut des invariants pour **chaque point de contrôle**.

Formalisation du problème

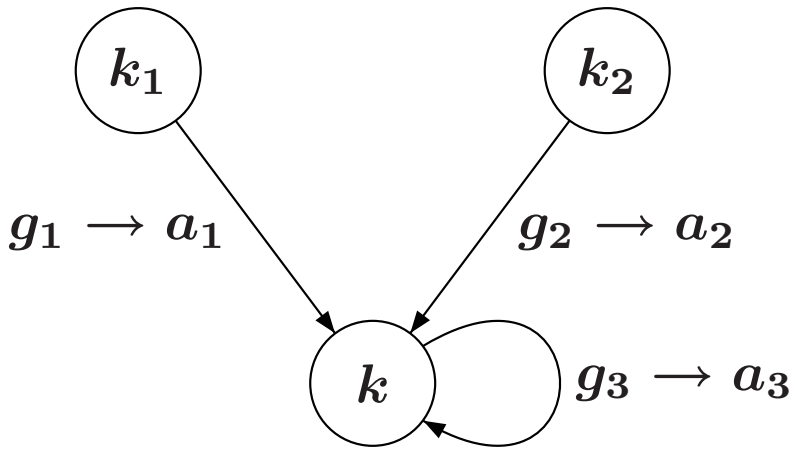
$\mathcal{A}_k$ = ensemble des **valuations** au point k :



$$\mathcal{A}_k = a_1(\mathcal{A}_{k_1} \cap g_1) \cup a_2(\mathcal{A}_{k_2} \cap g_2) \cup a_3(\mathcal{A}_k \cap g_3)$$

Formalisation du problème

$\mathcal{A}_k$ = ensemble des **valuations** au point k :



$$\mathcal{A}_k = a_1(\mathcal{A}_{k_1} \cap g_1) \cup a_2(\mathcal{A}_{k_2} \cap g_2) \cup a_3(\mathcal{A}_k \cap g_3)$$

- Système d'équations $X = F(X)$, **point fixe**.
- $X_0, F(X_0), F(F(X_0), \ldots$
  - Représentation des valuations, calcul.
  - Convergence de la résolution.

Résolution du système de point-fixe

Rappel des problèmes et résolution par Analyse des Relations Linéaires :

- Représentation, calcul
- Convergence de la résolution

Résolution du système de point-fixe

Rappel des problèmes et résolution par Analyse des Relations Linéaires :

- Représentation, calcul **polyèdres convexes**
- Convergence de la résolution **opérateur d'élargissement**

Résolution du système de point-fixe

Rappel des problèmes et résolution par Analyse des Relations Linéaires :

- Représentation, calcul **polyèdres convexes**
- Convergence de la résolution **opérateur d'élargissement**

▶ Résolution **approchée** mais **qui converge**

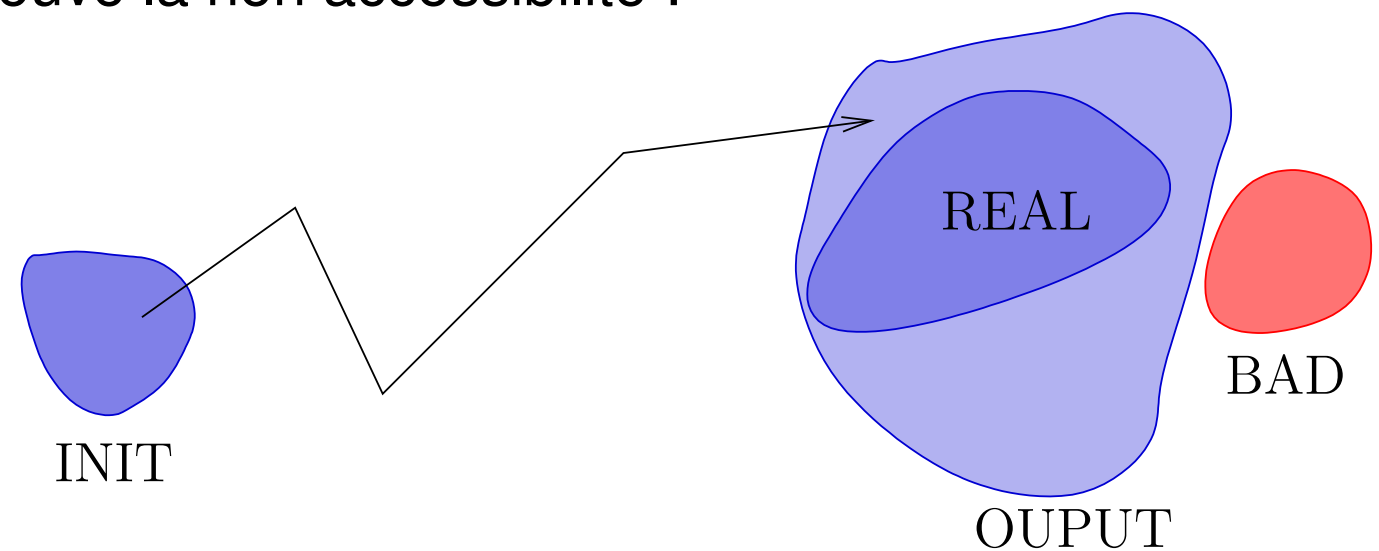
Résolution du système de point-fixe

Rappel des problèmes et résolution par Analyse des Relations Linéaires :

- Représentation, calcul **polyèdres convexes**
- Convergence de la résolution **opérateur d'élargissement**

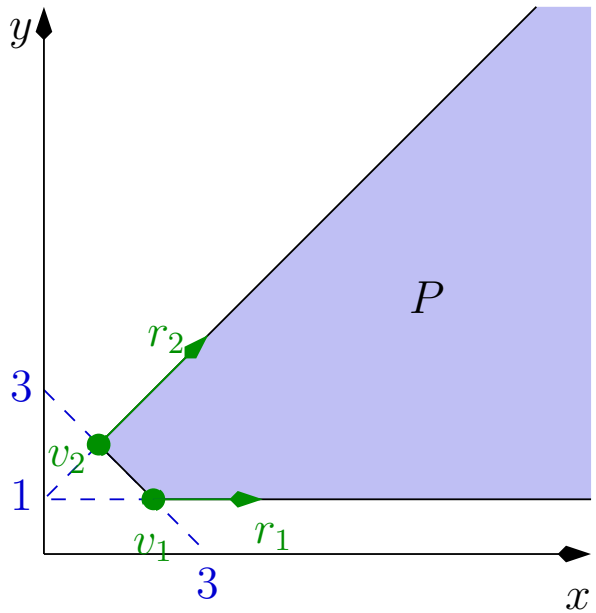
▶ Résolution **approchée** mais **qui converge**

On prouve la non accessibilité :



Résolution du système de point-fixe - 2

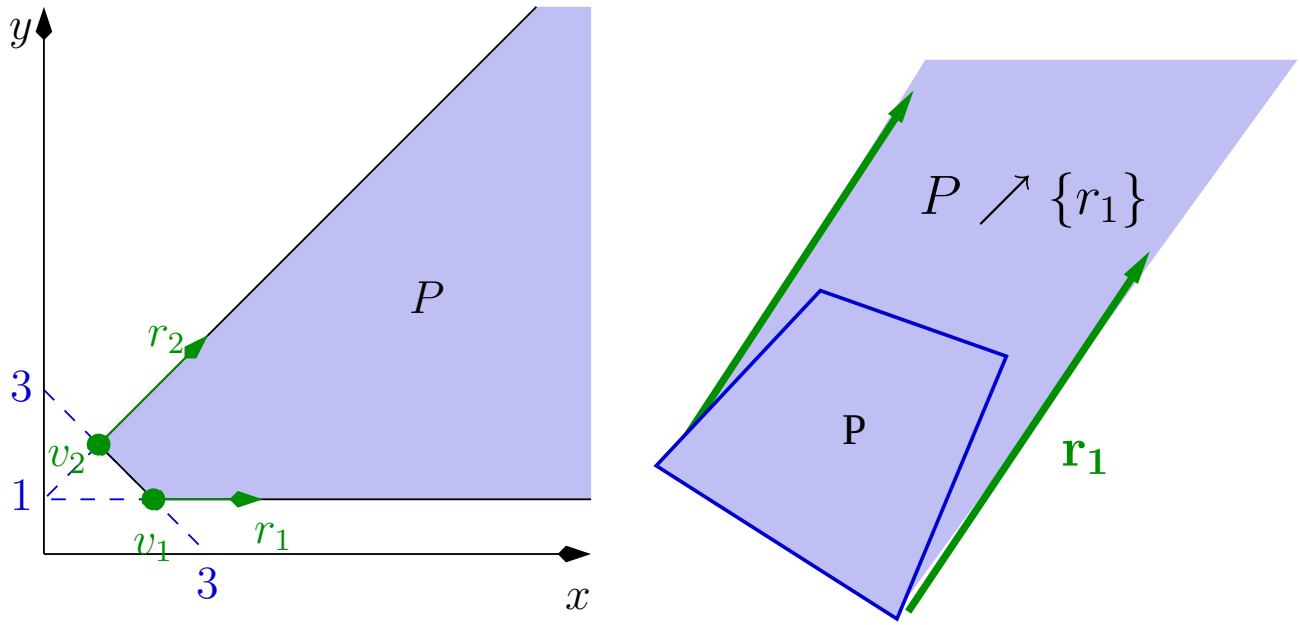
Représentation par polyèdres convexes :



- Algorithmique disponible et efficace (test du vide, intersection, union, transformation affine. . .)

Résolution du système de point-fixe - 2

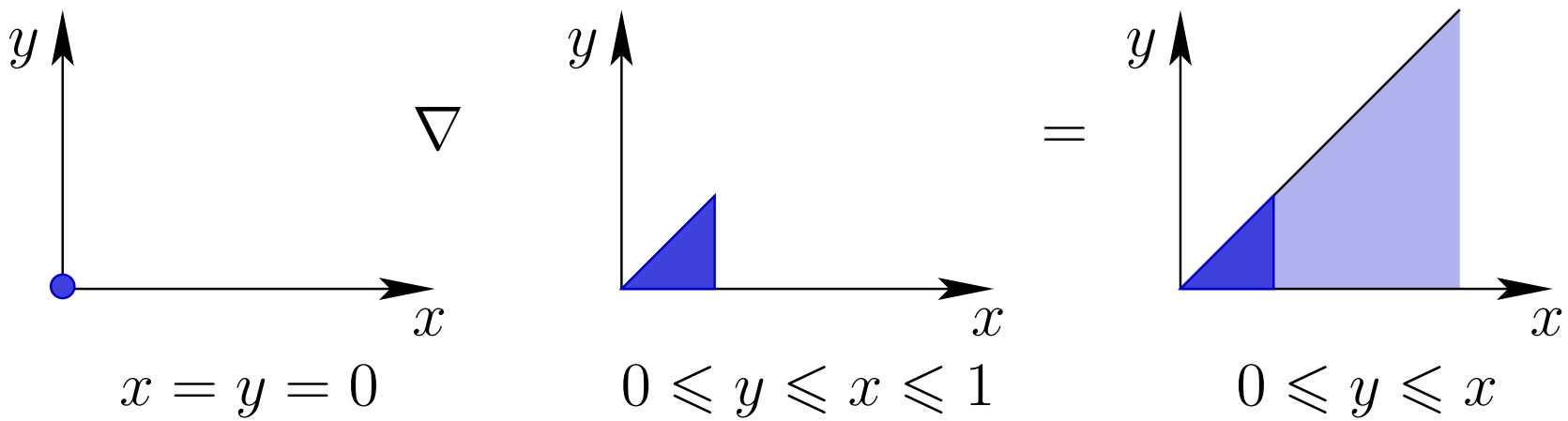
Représentation par polyèdres convexes :



- Algorithmique disponible et efficace (test du vide, intersection, union, transformation affine. . .)
- Ajout de rayon.

Résolution du système de point-fixe - 3

Élargissement : $P \nabla Q$: extrapolation de la limite.
Le système de contrainte de $P \nabla Q$ est obtenu en enlevant du système de P les contraintes non satisfaites par Q :



$x = y = 0$ $\quad$ $0 \leqslant y \leqslant x \leqslant 1$ $\quad$ $0 \leqslant y \leqslant x$

Astuce (!) : $\{x = y = 0\} = \{0 \leqslant y \leqslant x \leqslant 0\}$

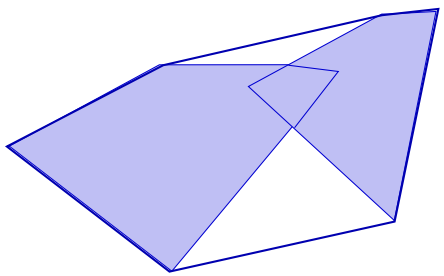
Les problèmes de l'Analyse des Relations Linéaires

Sources de complexité :

- nombre de points de contrôle.
- nombre de variables numériques.

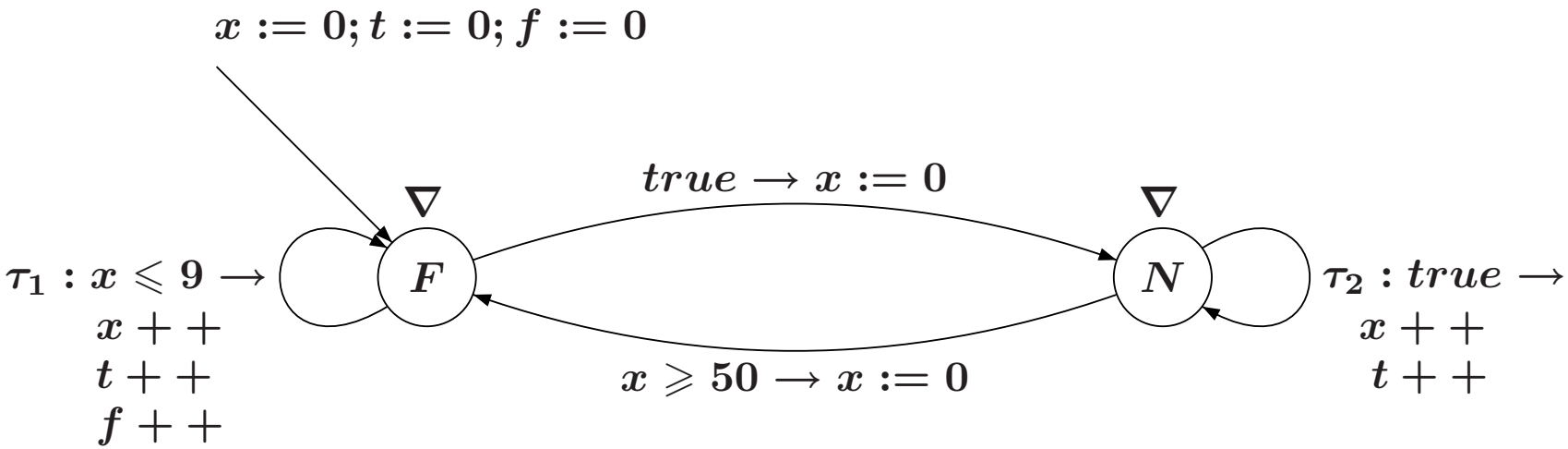
Sources d'approximation :

- Enveloppe convexe :



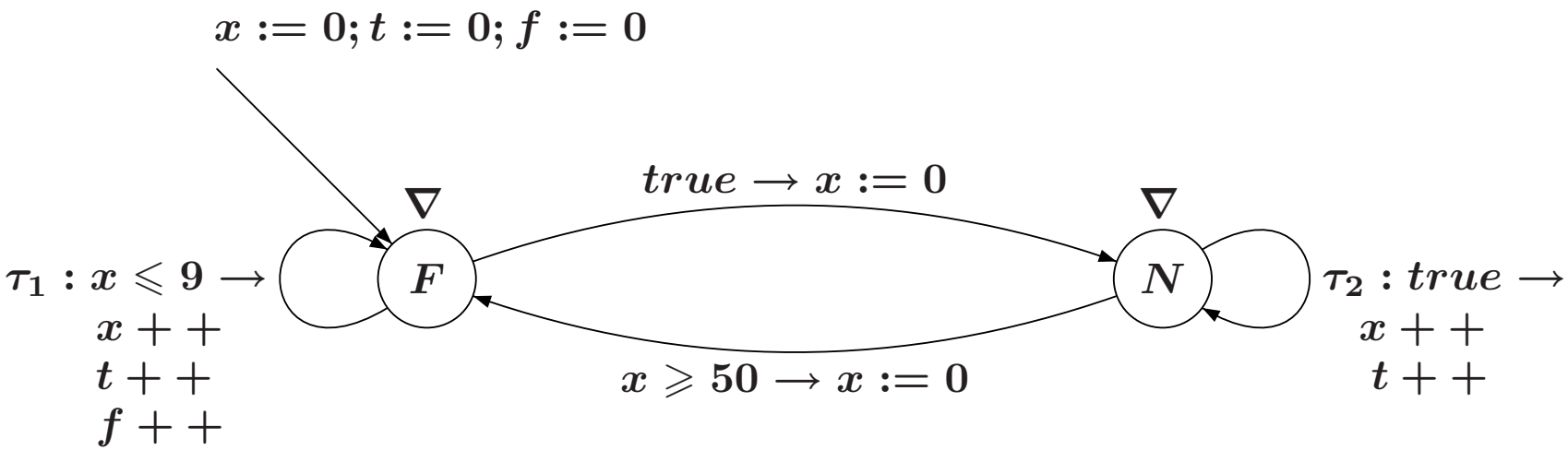
- **Élargissement**.

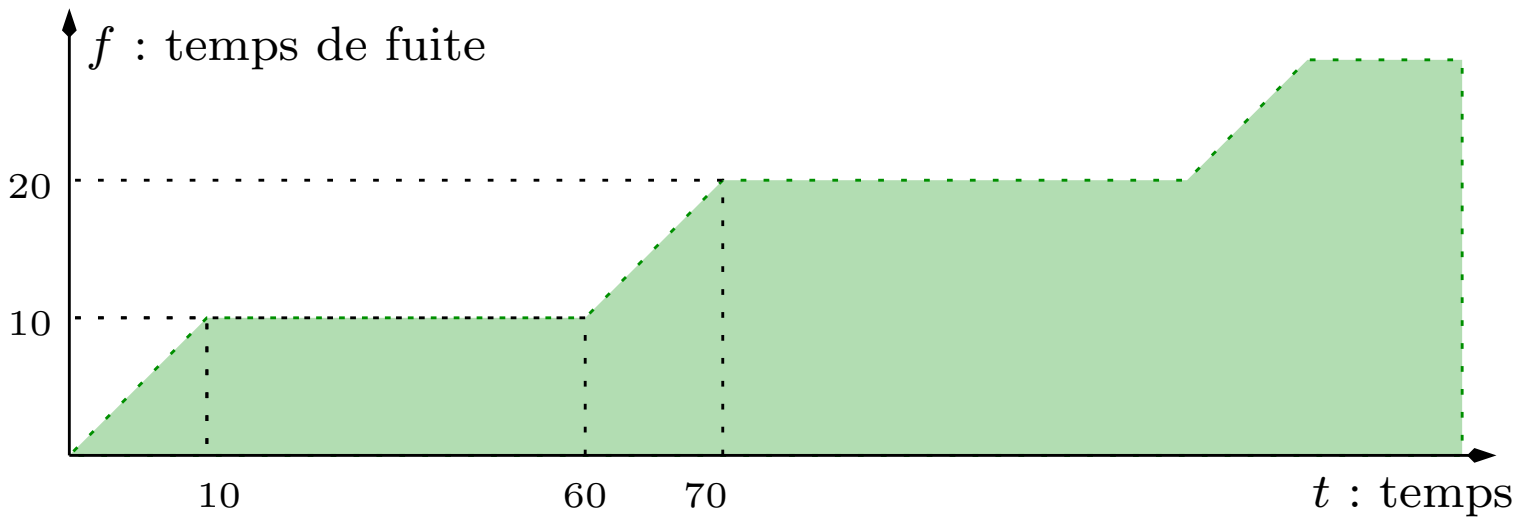
L'exemple de la chaudière - 1



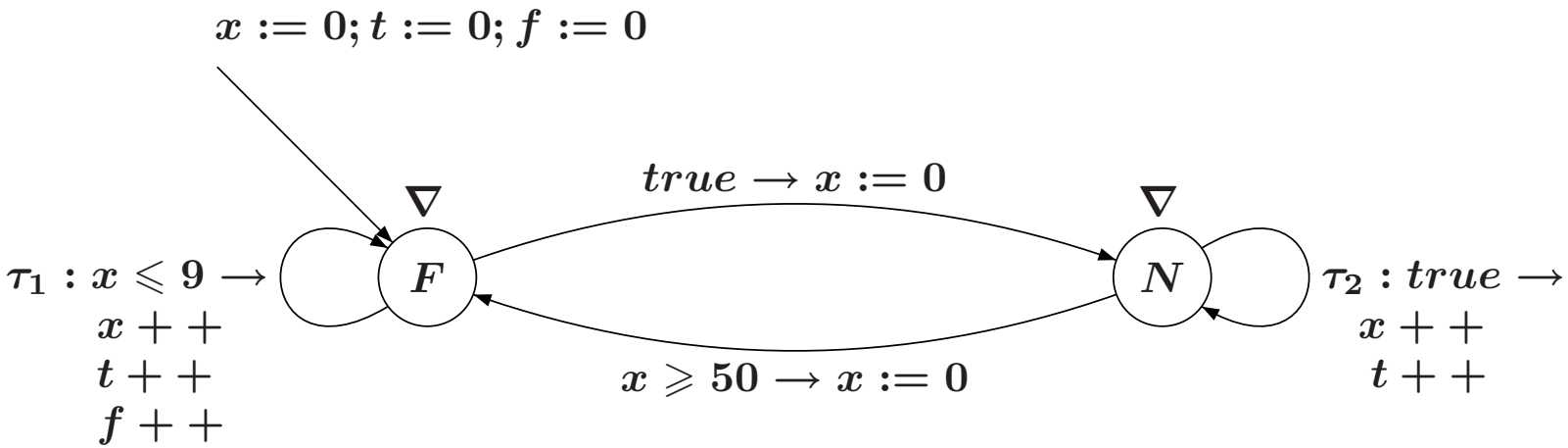
- f le temps de fuite global.
- t le temps global.
- x variable locale.

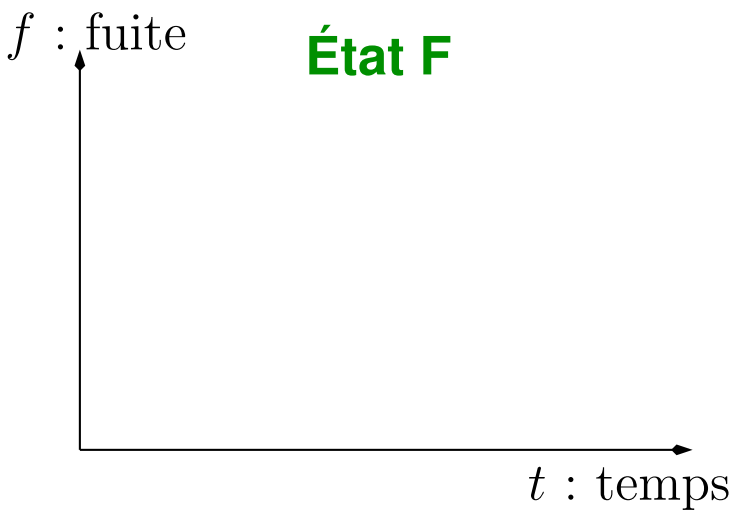
La chaudière 2 - Comportement réel

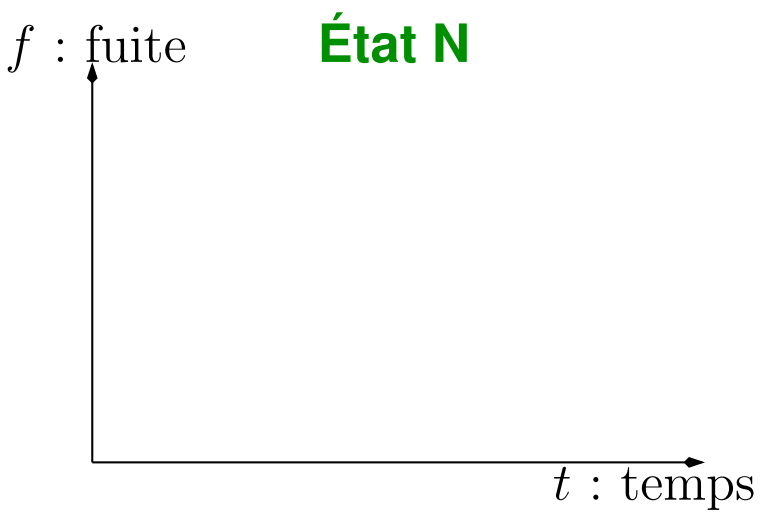




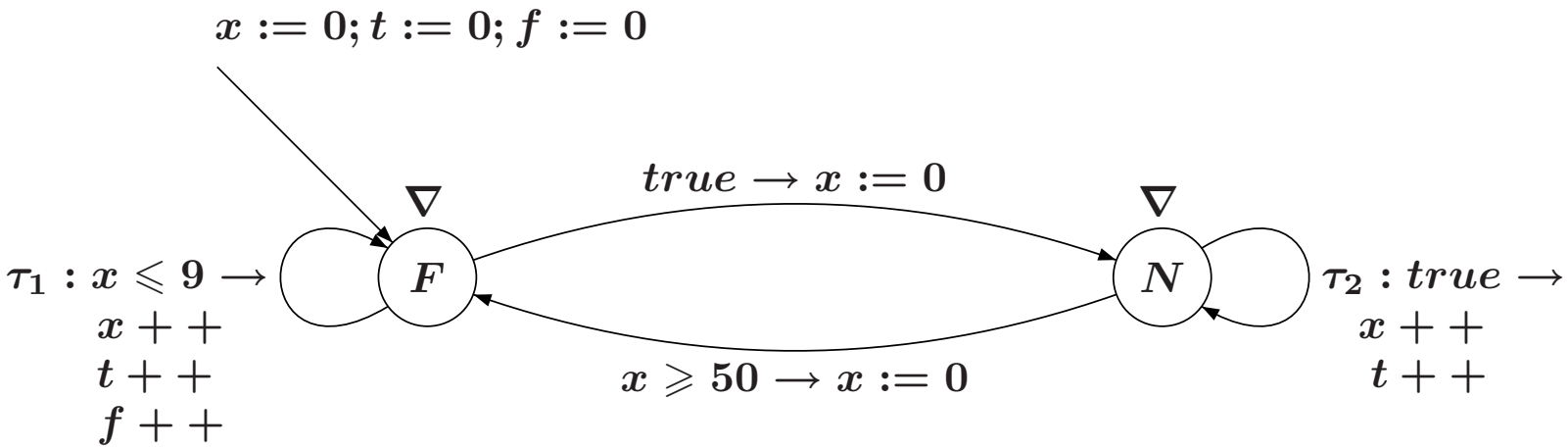
La chaudière 3 - Analyse des Relations Linéaires

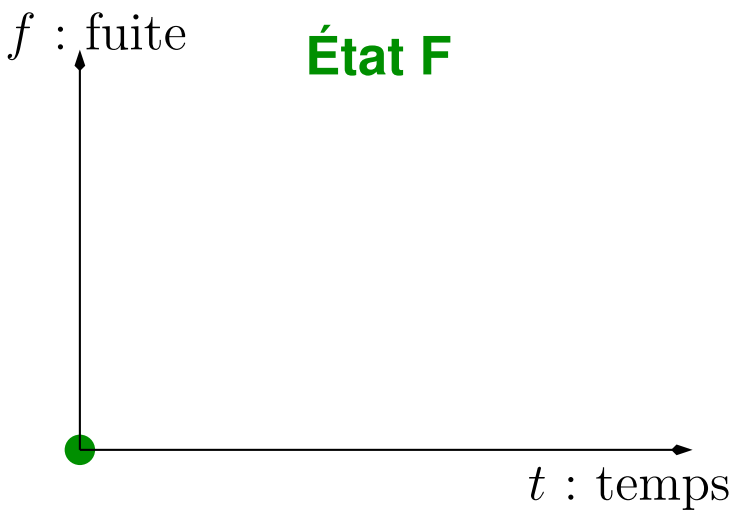


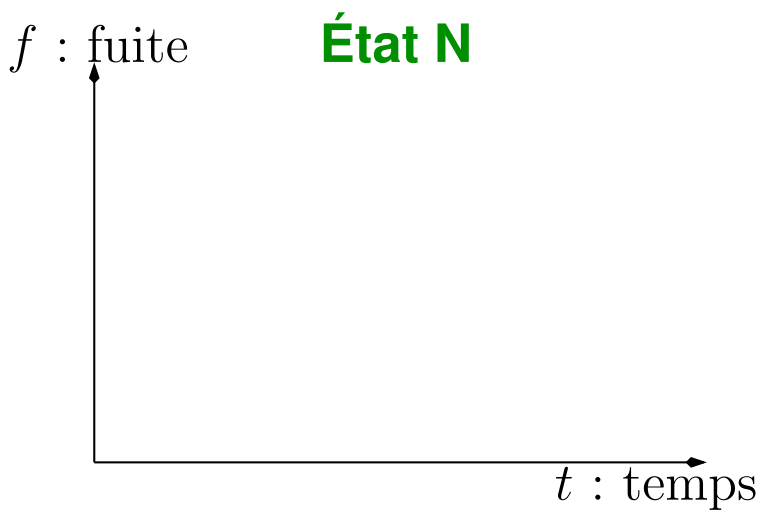




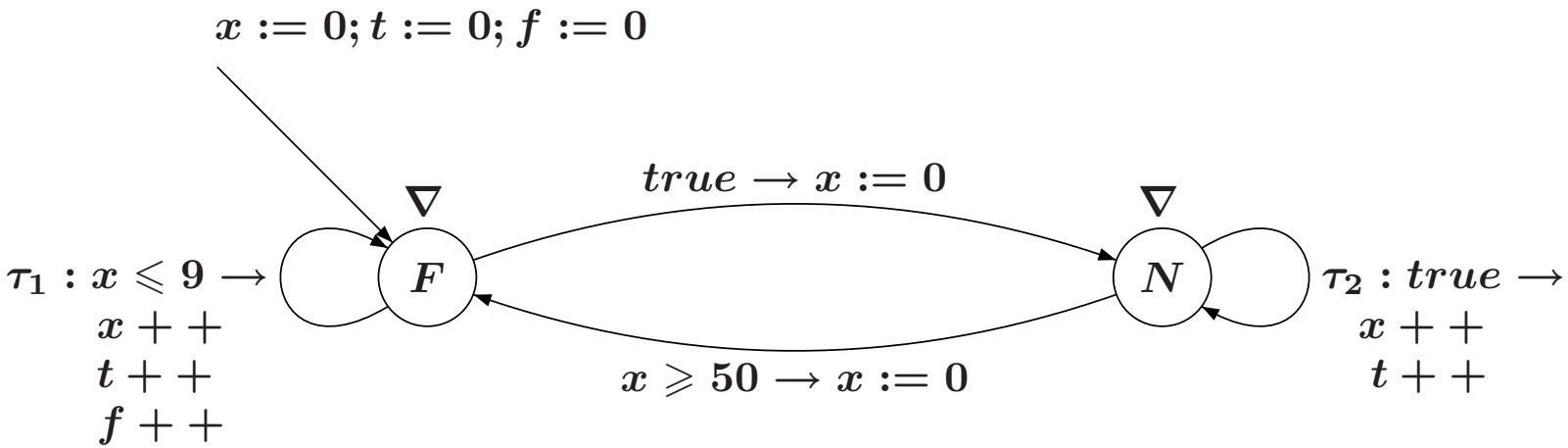
La chaudière 3 - Analyse des Relations Linéaires

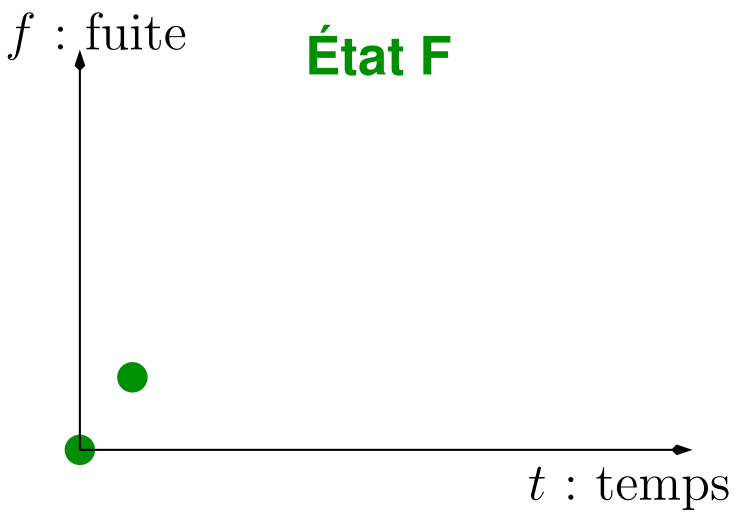


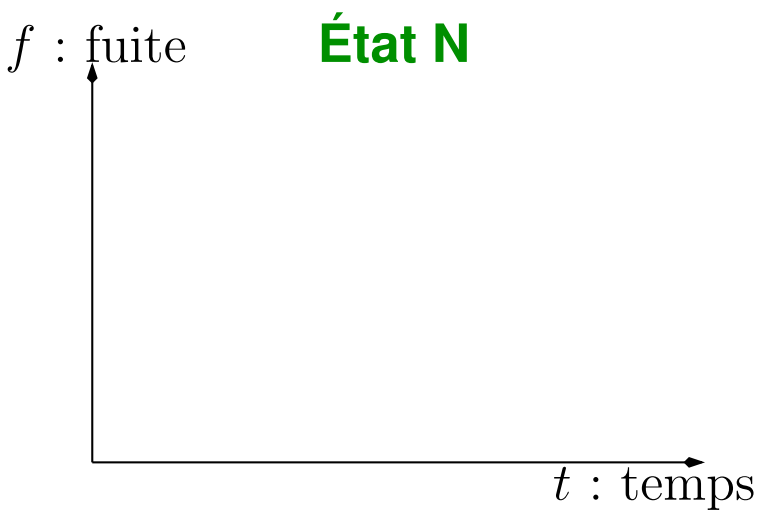




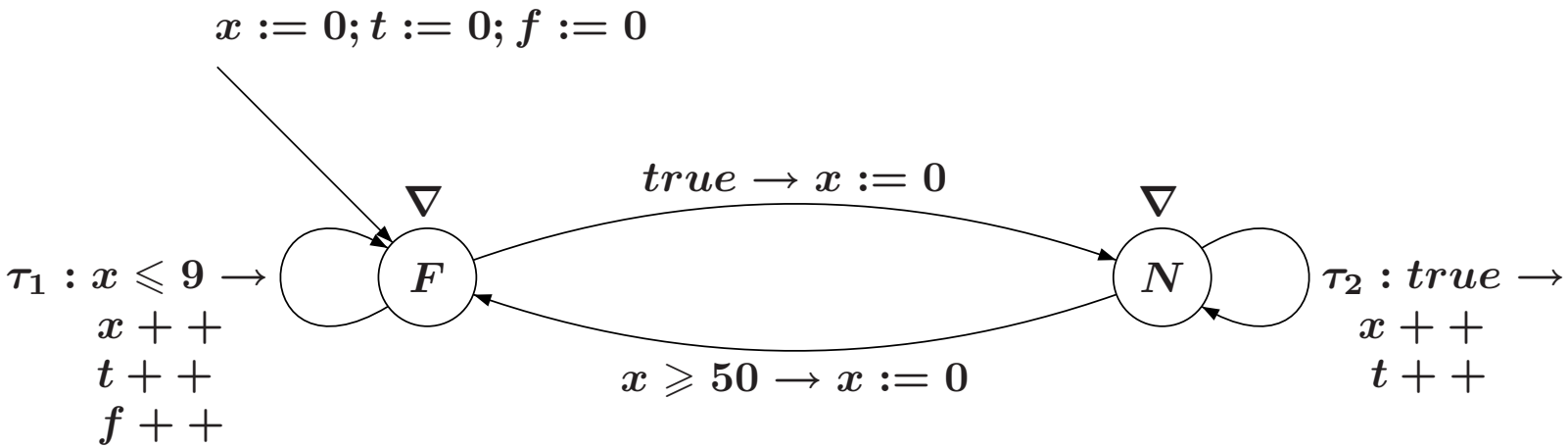
La chaudière 3 - Analyse des Relations Linéaires

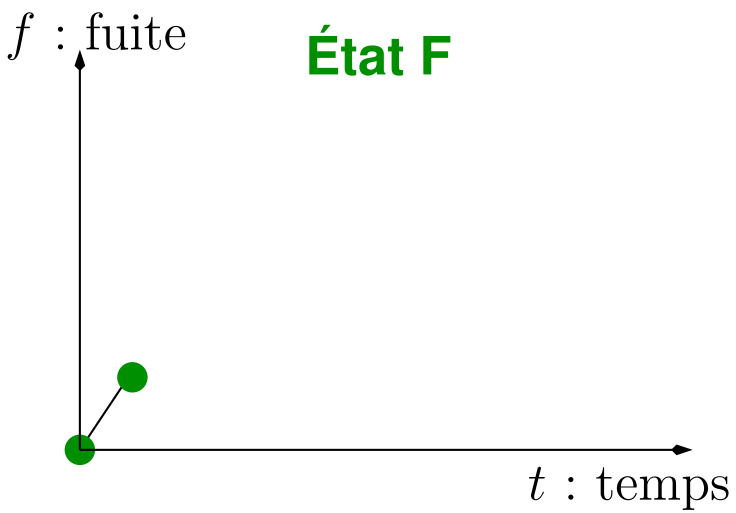


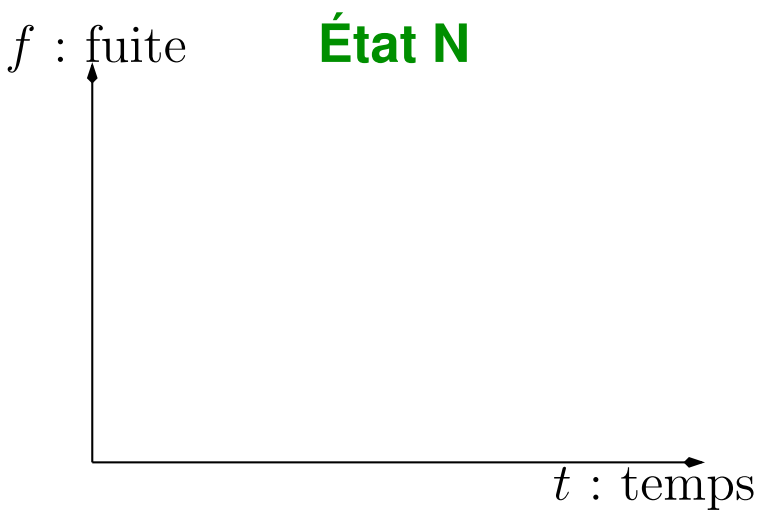




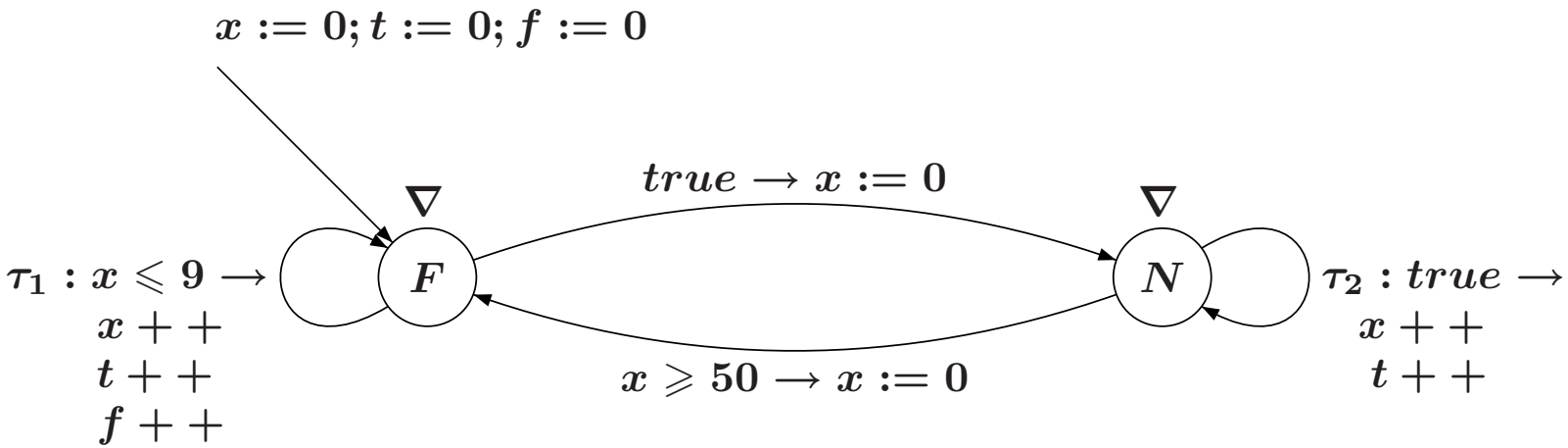
La chaudière 3 - Analyse des Relations Linéaires

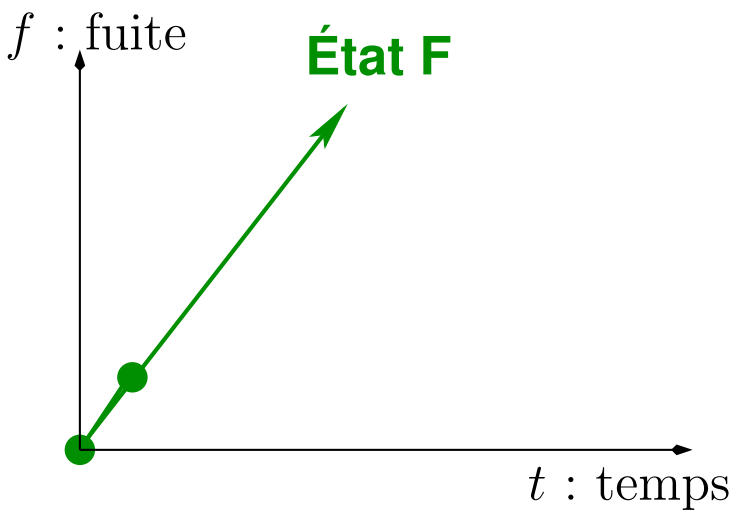


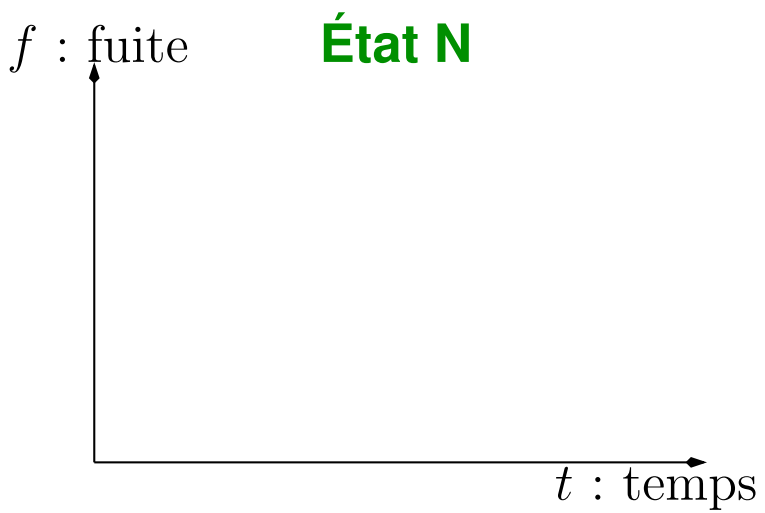




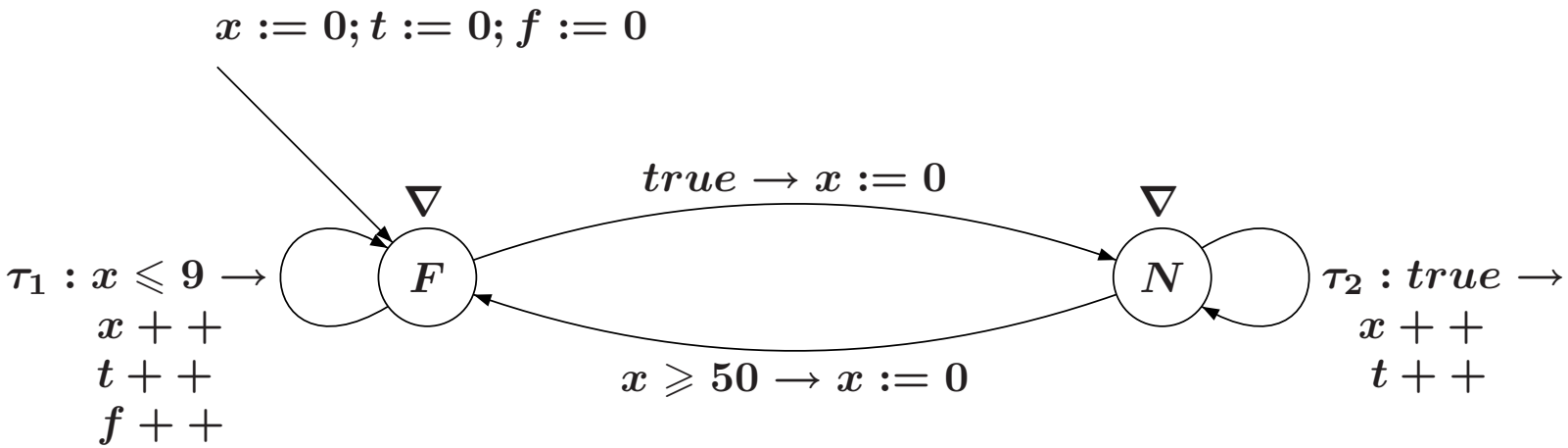
La chaudière 3 - Analyse des Relations Linéaires

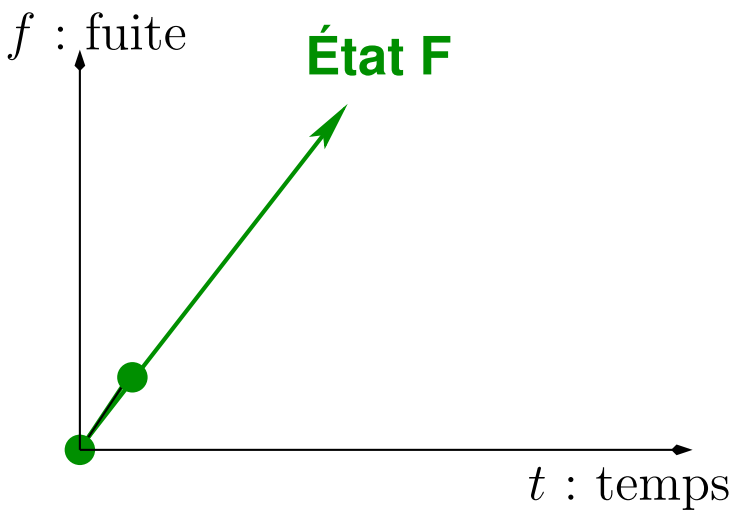


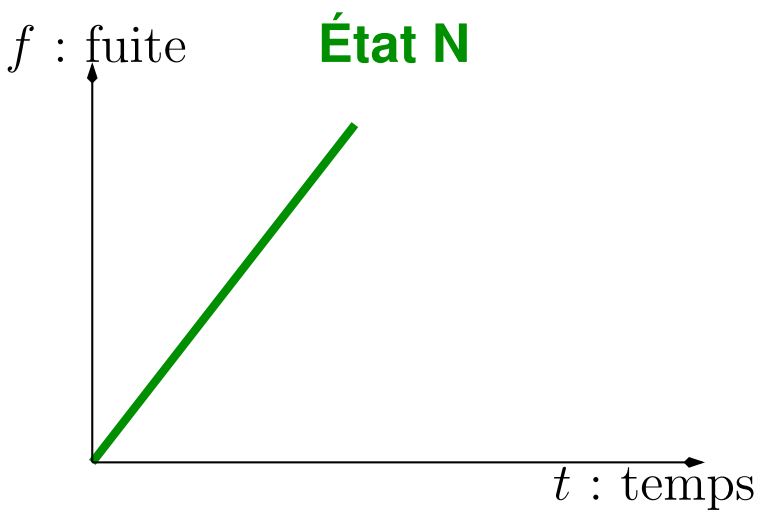




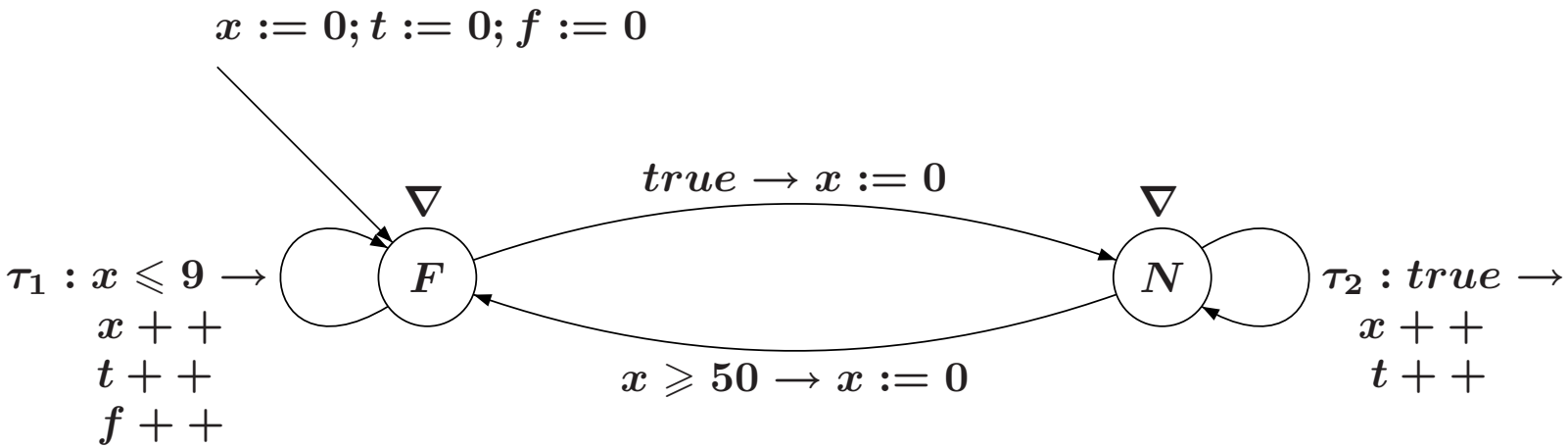
La chaudière 3 - Analyse des Relations Linéaires

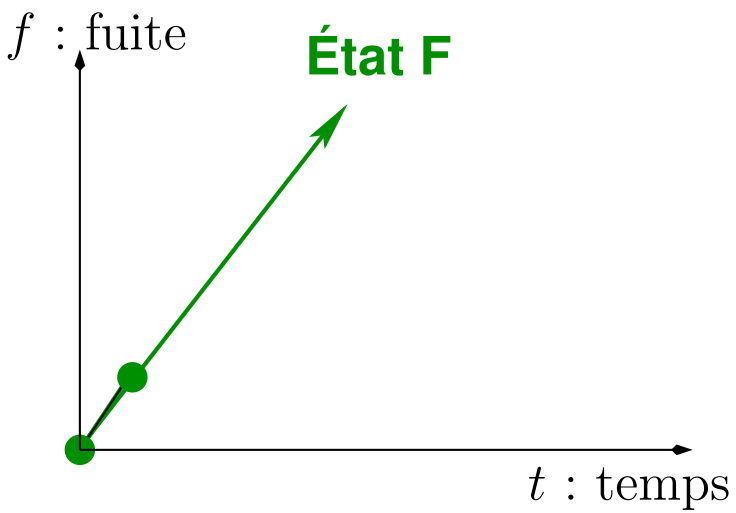


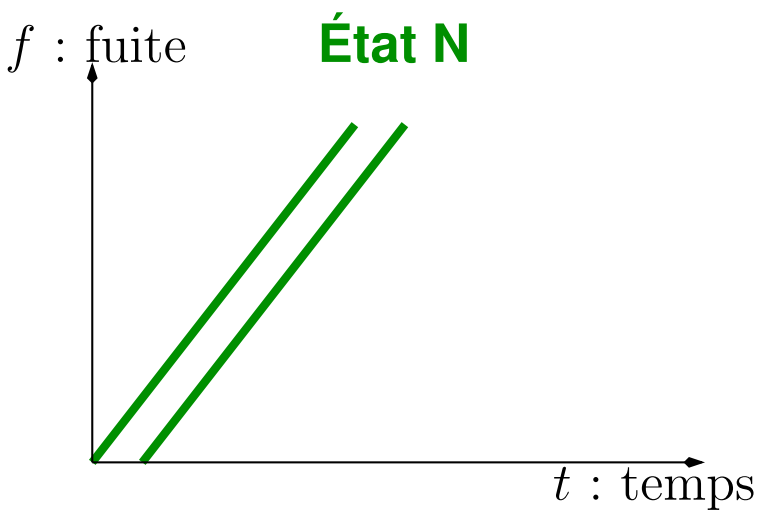




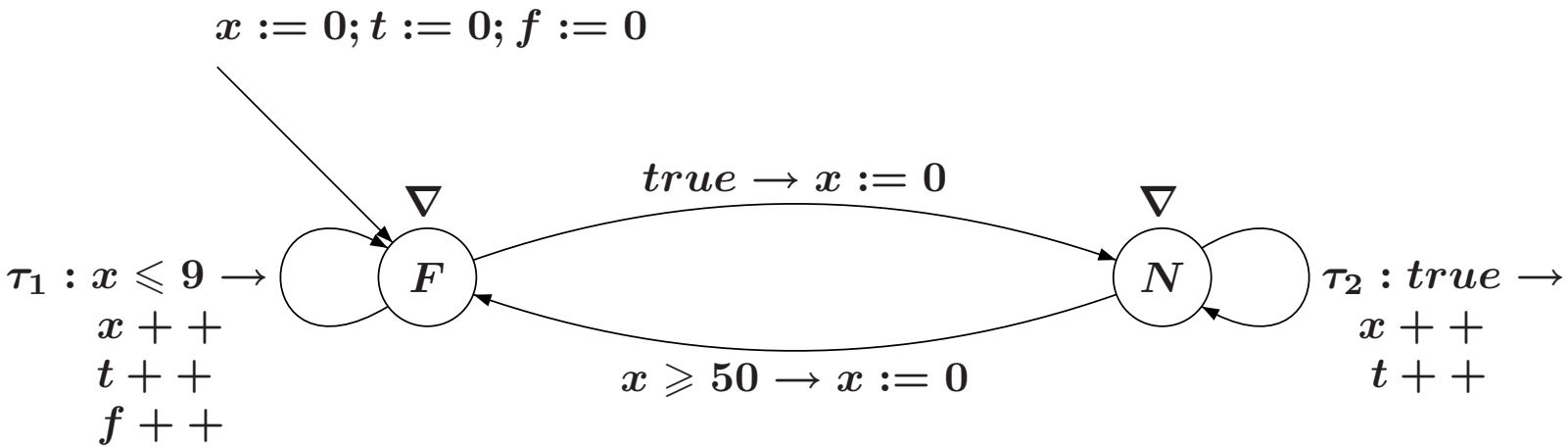
La chaudière 3 - Analyse des Relations Linéaires

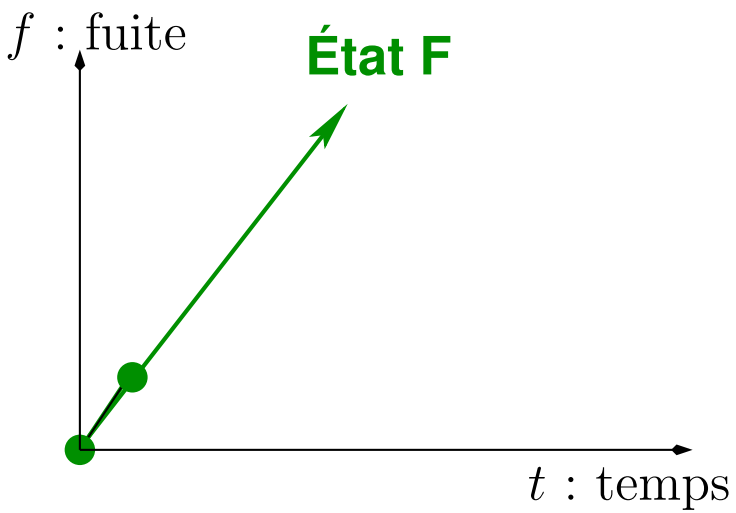


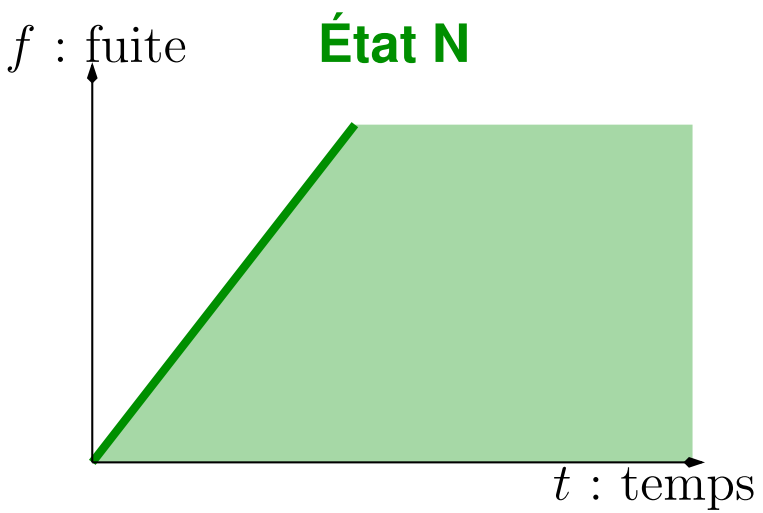




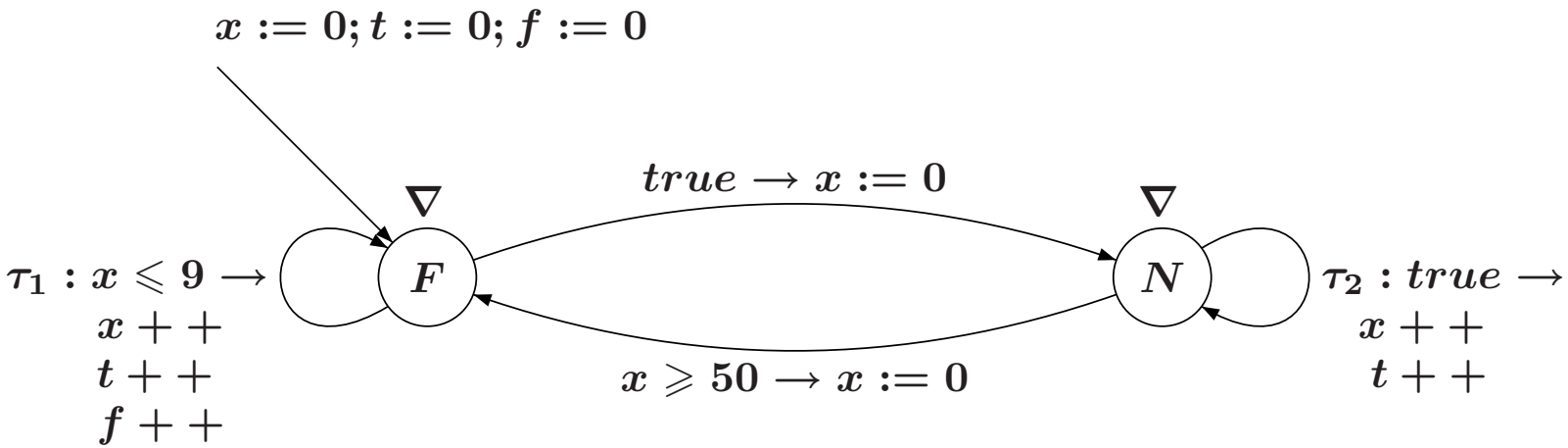
La chaudière 3 - Analyse des Relations Linéaires

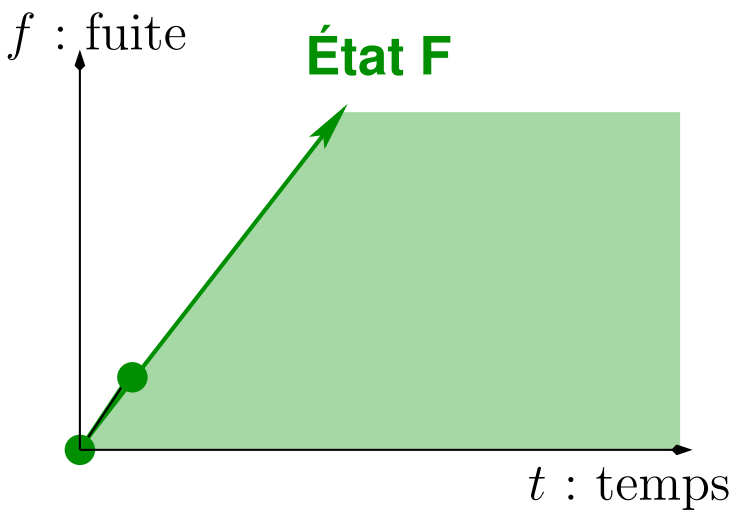


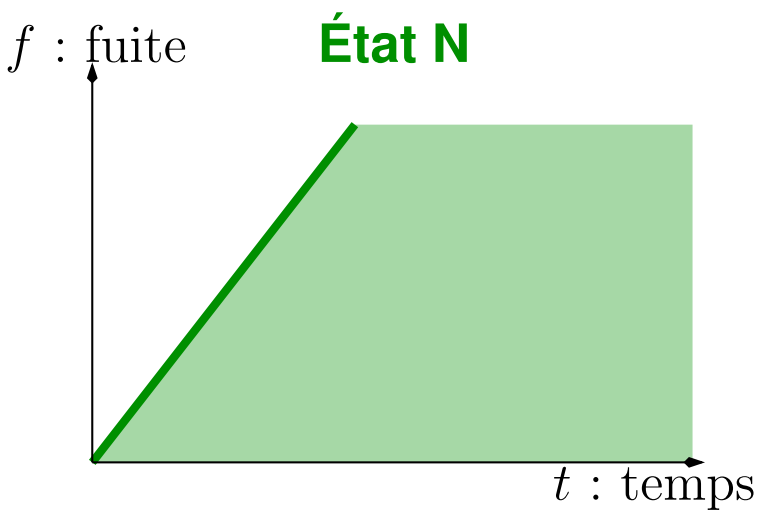




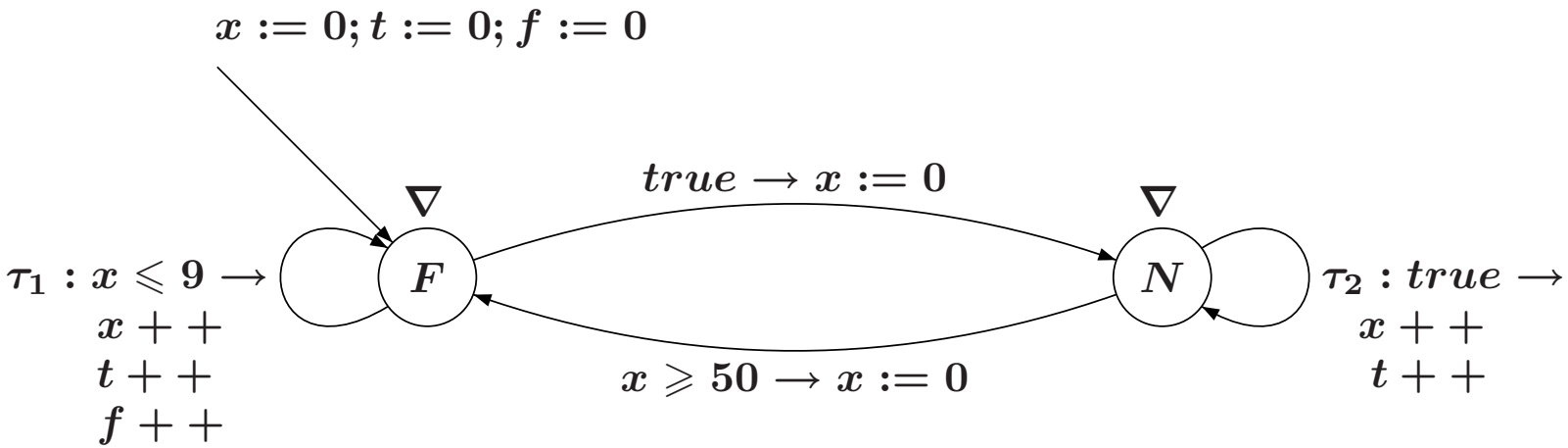
La chaudière 3 - Analyse des Relations Linéaires

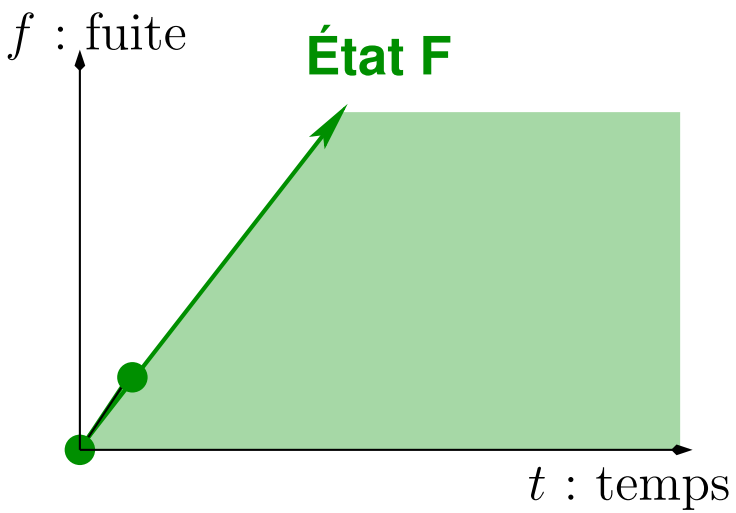


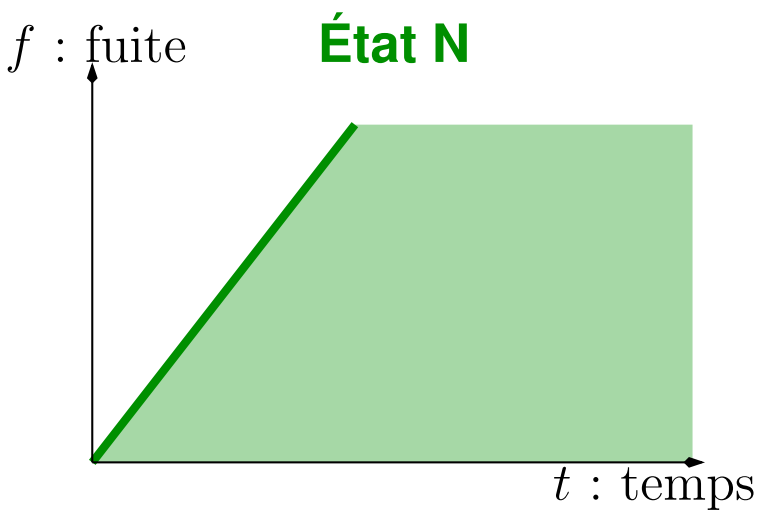




La chaudière 3 - Analyse des Relations Linéaires

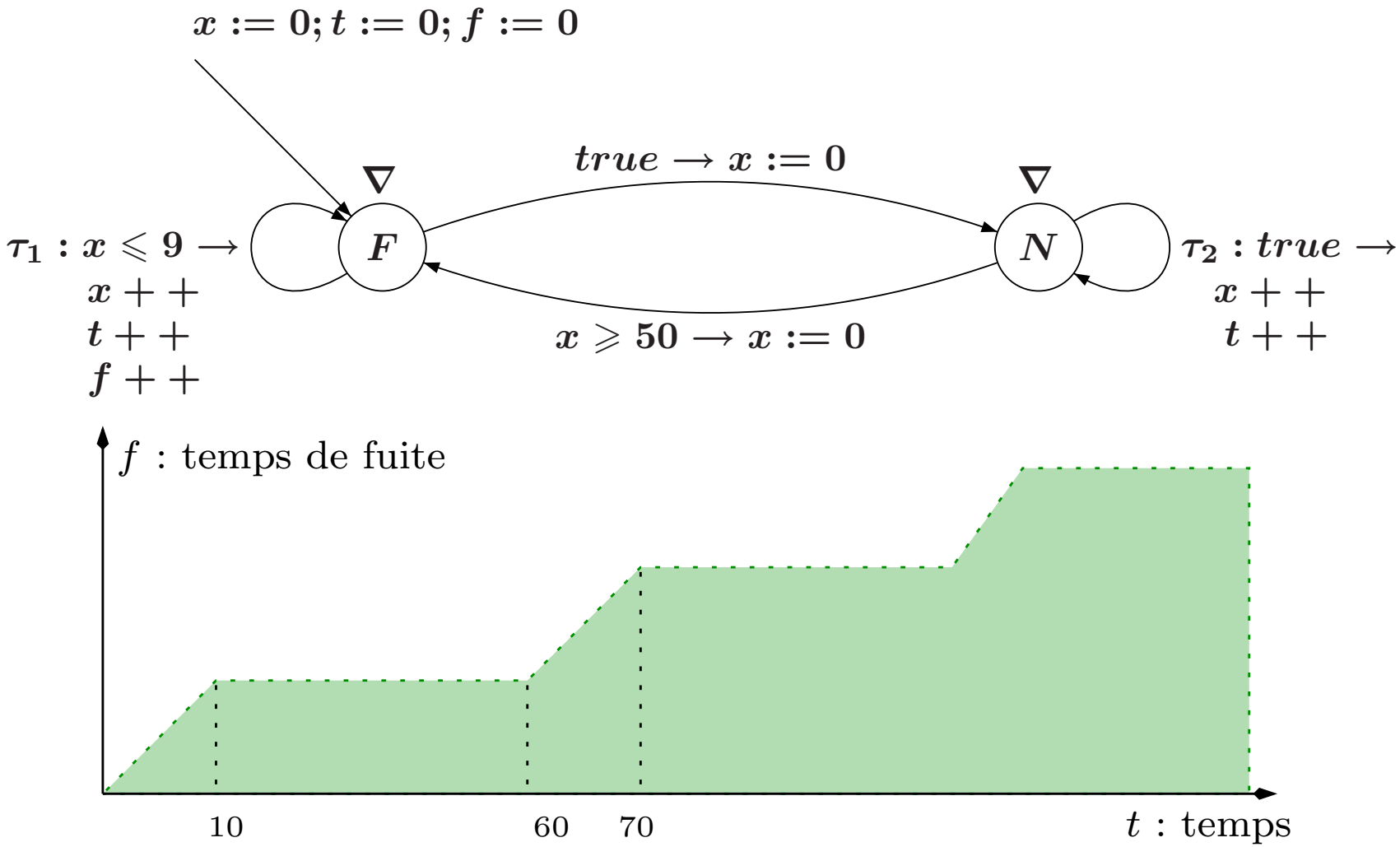




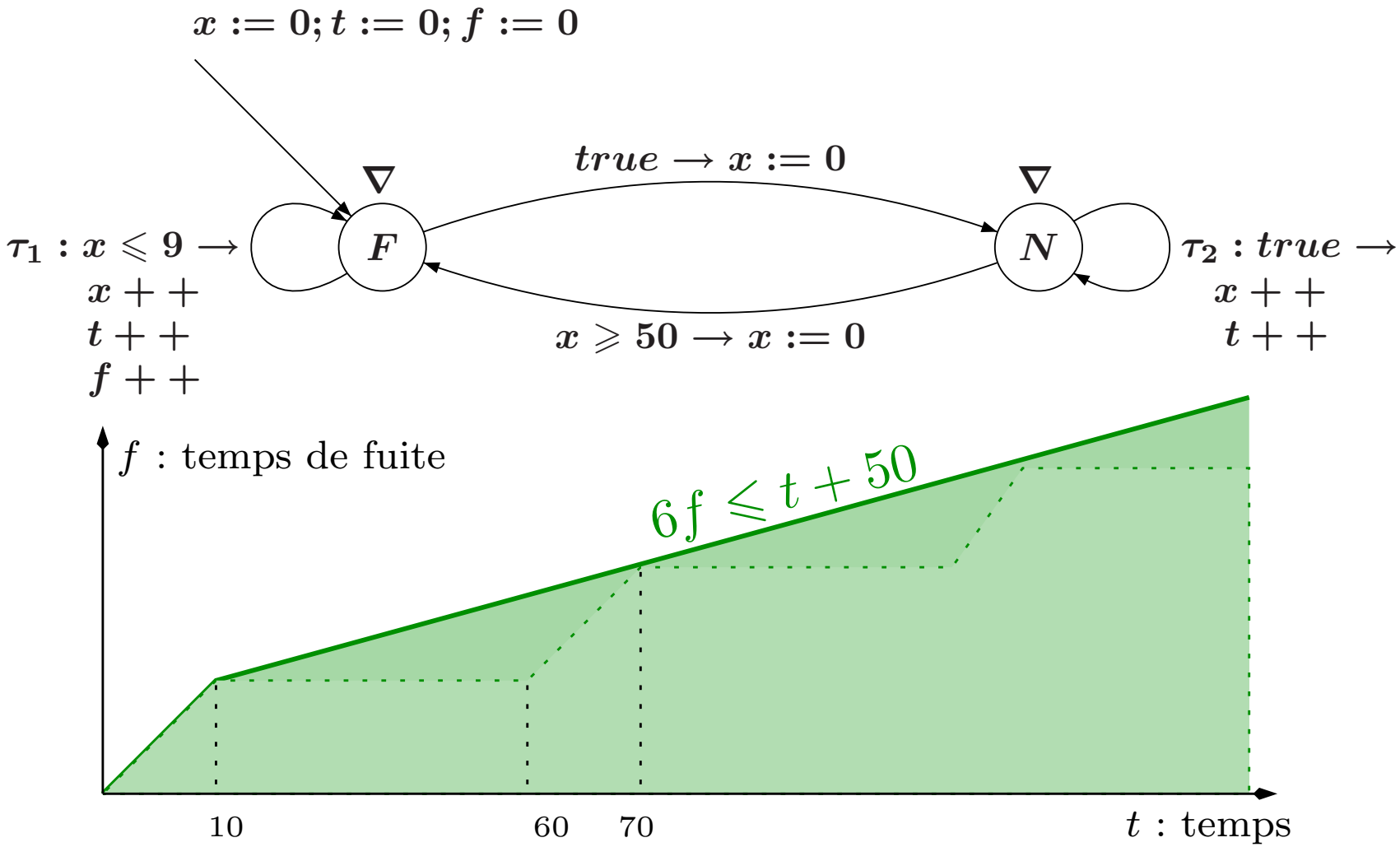


- Convergence, approximation supérieure, mais manque de précision.

La chaudière - Invariant voulu



La chaudière - Invariant voulu



Amélioration de la précision

Des méthodes existent mais sont **adhoc** (en général).

- Regardons les méthodes **exactes (accélération)** :
  - On calcule l'effet exact des boucles sur des ensembles d'**entiers**.
  - Codage sous forme d'automates représentant des formules de Presburger, par ex : $\exists k, x = y + 2k$.

Amélioration de la précision

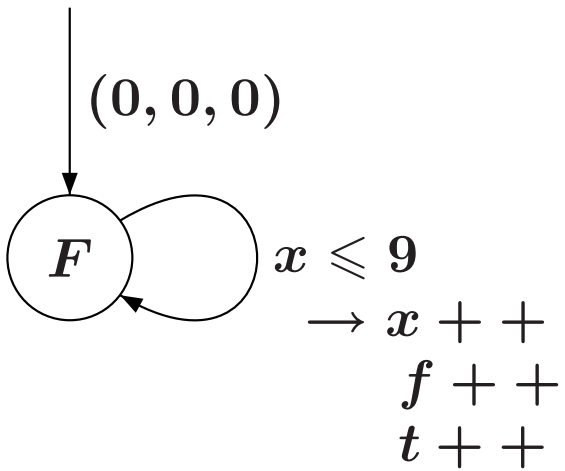
Des méthodes existent mais sont **adhoc** (en général).

- Regardons les méthodes **exactes (accélération)** :
  - On calcule l'effet exact des boucles sur des ensembles d'**entiers**.
  - Codage sous forme d'automates représentant des formules de Presburger, par ex : $\exists k, x = y + 2k$.

- Inconvénients : classes restreintes de programmes, haute complexité.

Exemple de la chaudière (3)

La boucle est « accélérable » :



- Effet **exact** : $\exists i \in \mathbb{N}, x = f = t = i, 0 \leqslant i \leqslant 10$

Contribution : théorie, algorithmique

Définition de la notion d'accélération abstraite qui :

- Permet d'obtenir des approximations supérieures **précises** à faible coût.
- Se combine bien avec l'élargissement.

Contribution : théorie, algorithmique

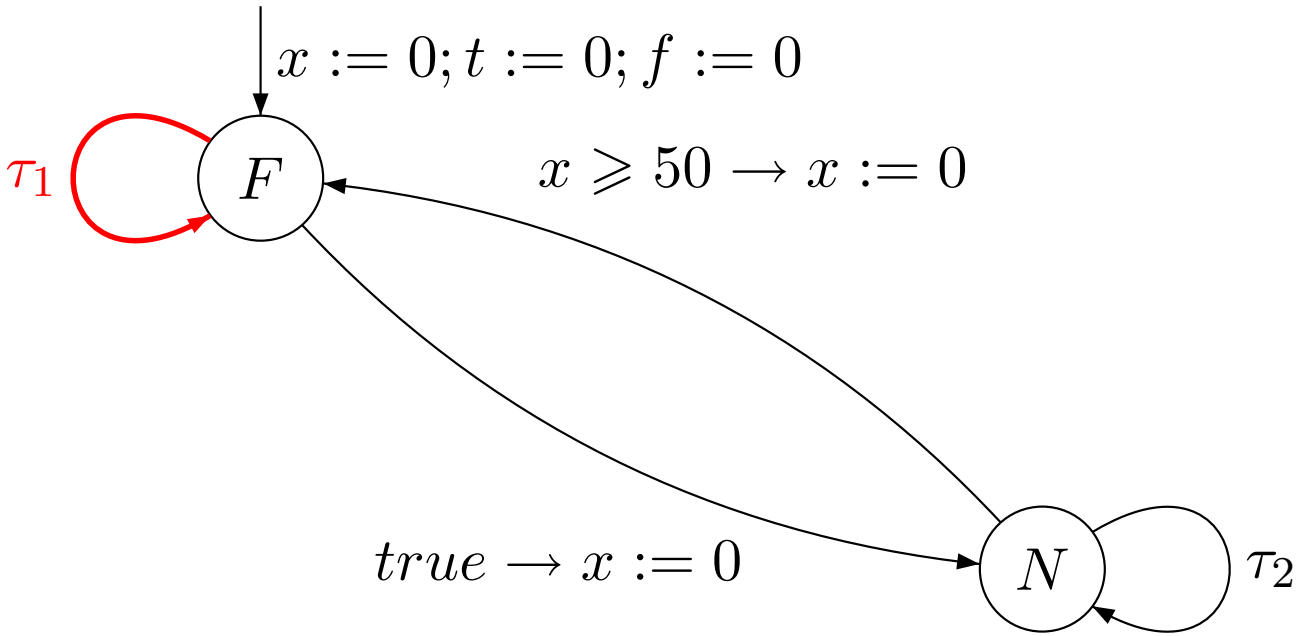
Définition de la notion d'accélération abstraite qui :

- Permet d'obtenir des approximations supérieures **précises** à faible coût.
- Se combine bien avec l'élargissement.

- cf SAS 2006 et ma thèse.

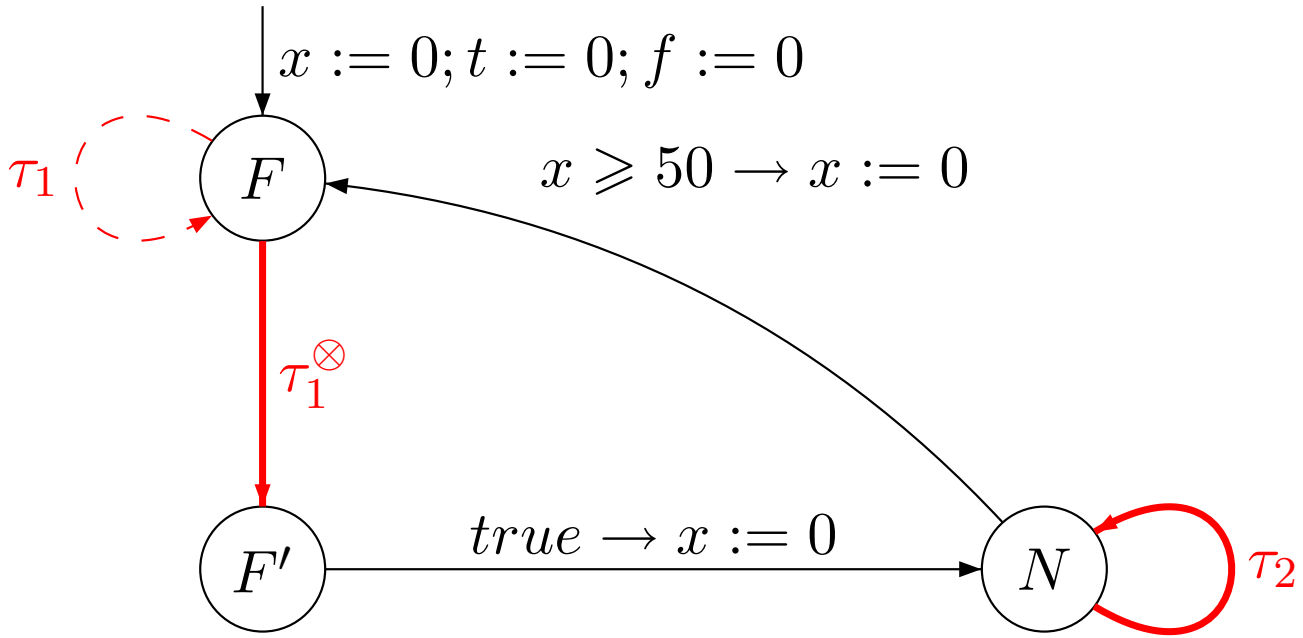
Accélération et partitionnement

On remplace les boucles ($\tau_i : g_i \rightarrow a_i$)



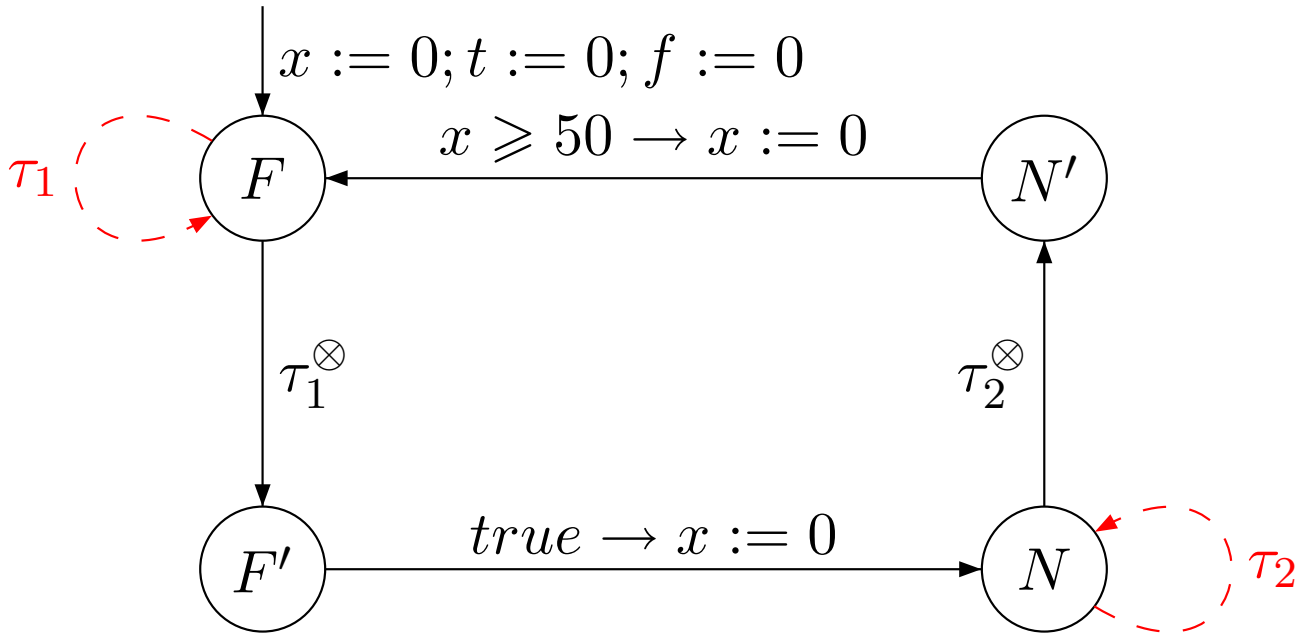
Accélération et partitionnement

On remplace les boucles ($\tau_i : g_i \rightarrow a_i$)



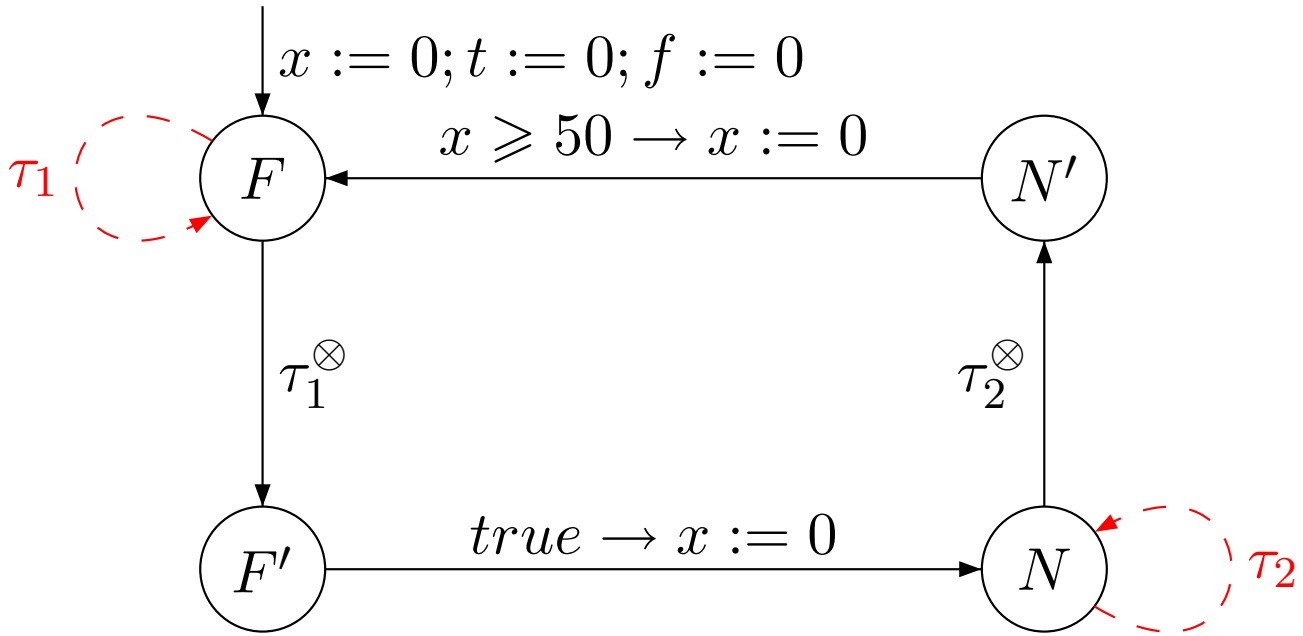
Accélération et partitionnement

On remplace les boucles ($\tau_i : g_i \rightarrow a_i$)



Accélération et partitionnement

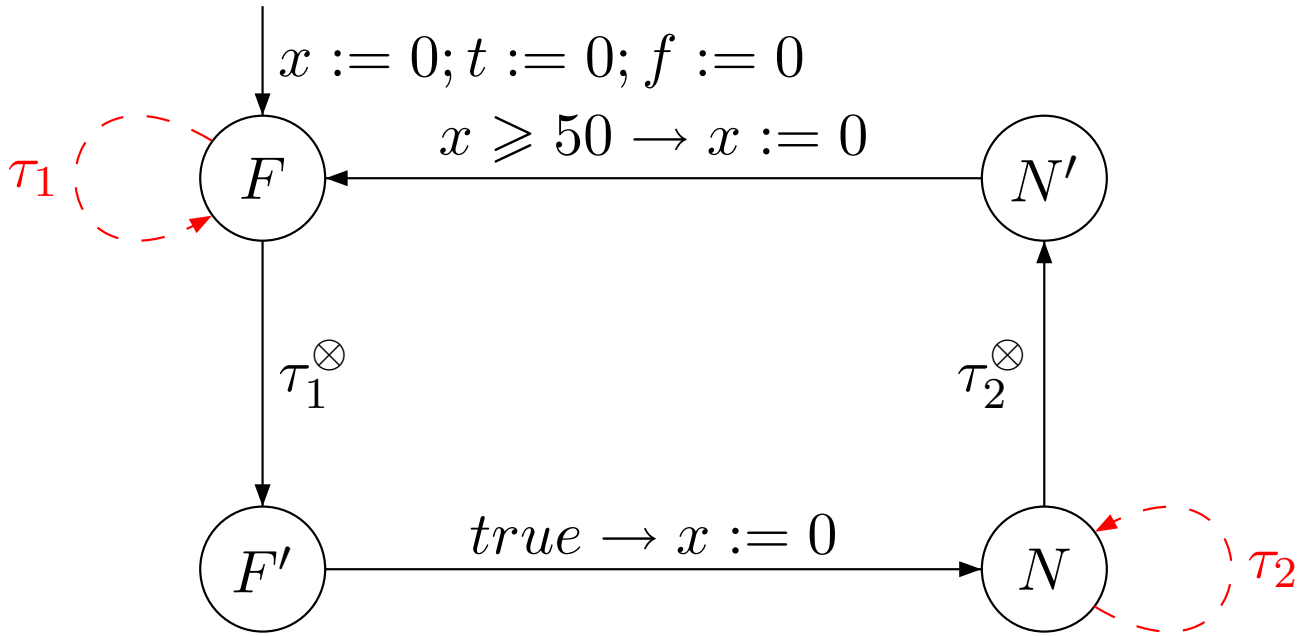
On remplace les boucles ($\tau_i : g_i \rightarrow a_i$)



- $\tau_i^{\otimes}$ résume l'effet d'une application de τ_i un **nombre quelconque de fois**

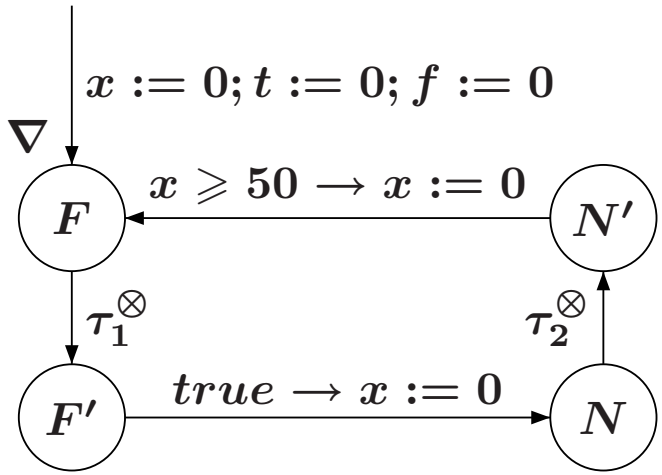
Accélération et partitionnement

On remplace les boucles ($\tau_i : g_i \rightarrow a_i$)



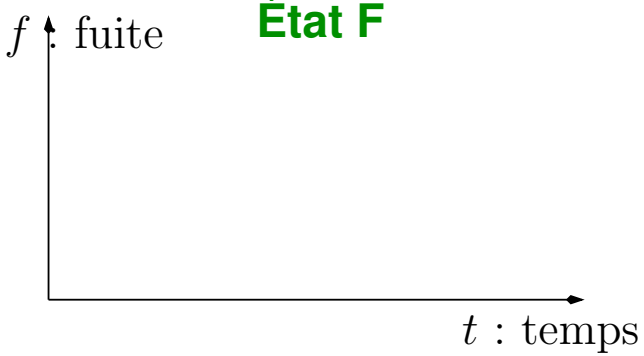
- $\tau_i^{\otimes}$ résume l'effet d'une application de τ_i un **nombre quelconque de fois**
- Boucle englobante : **accélérée** ou **élargie**.

Le retour de la chaudière

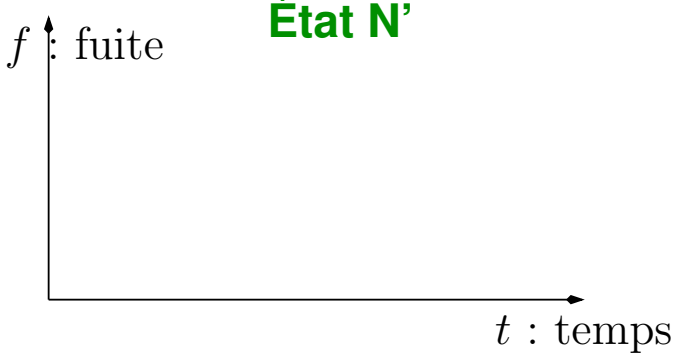


- $\tau_1^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 1, 1)$ tant que $x \leqslant 10$”
- $\tau_2^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 0, 1)$”

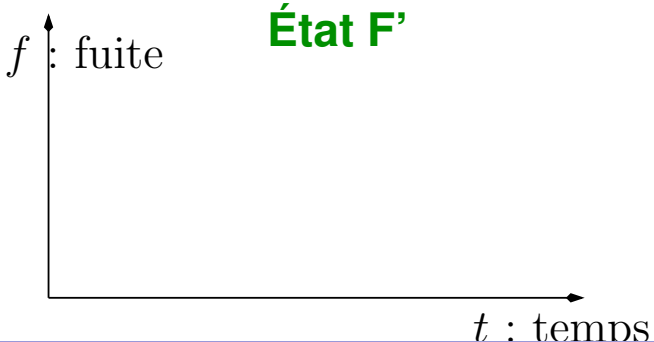
État F



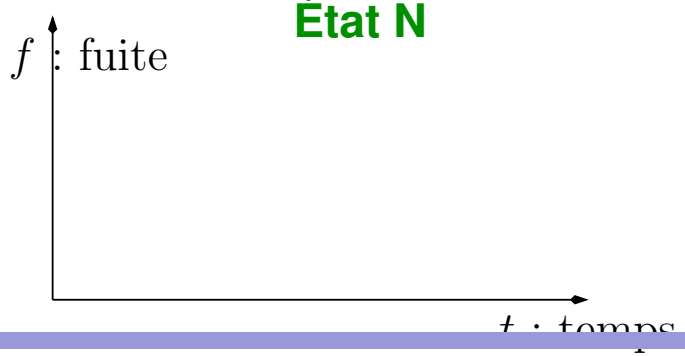
État N’



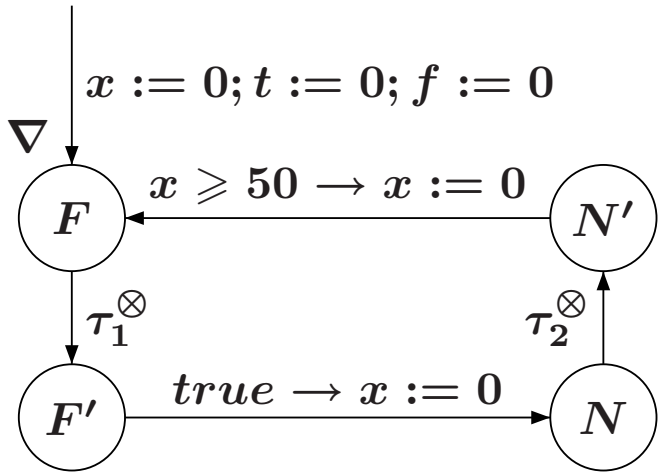
État F’



État N

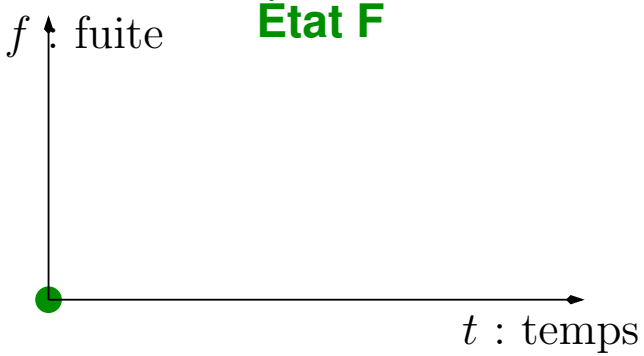


Le retour de la chaudière

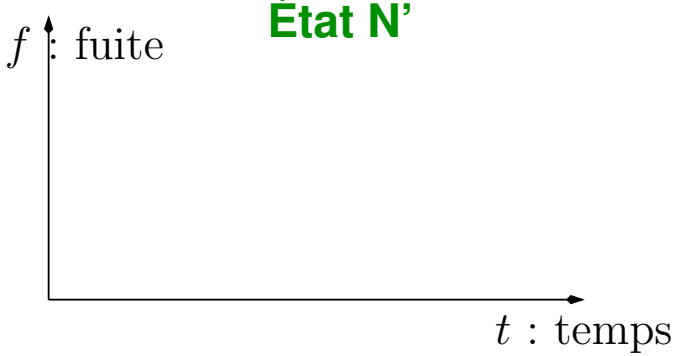


- $\tau_1^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 1, 1)$ tant que $x \leqslant 10$”
- $\tau_2^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 0, 1)$”

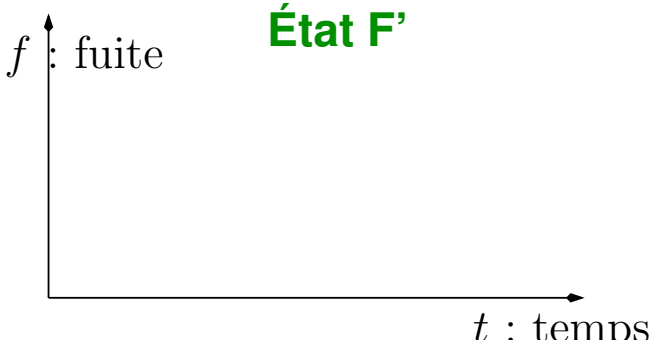
État F



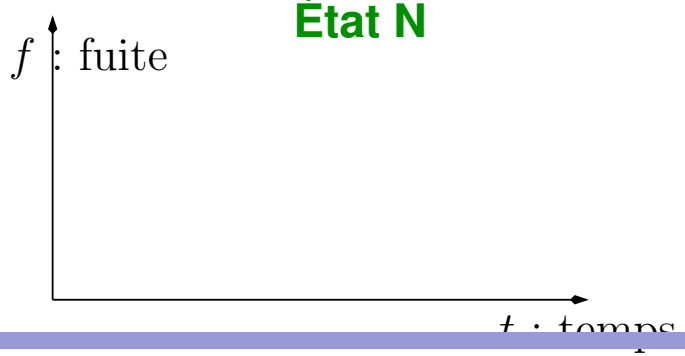
État N’



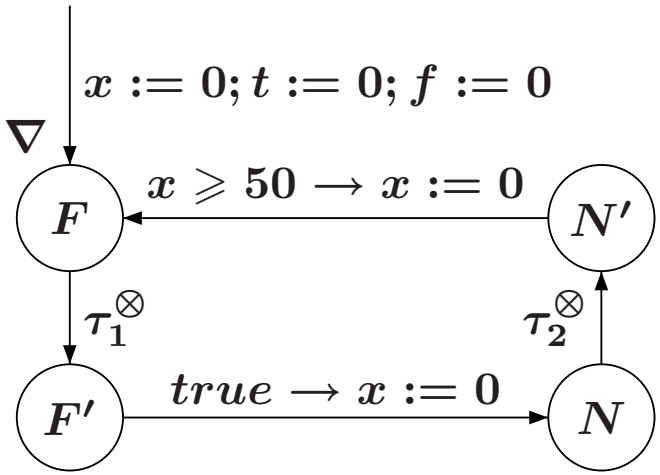
État F’



État N

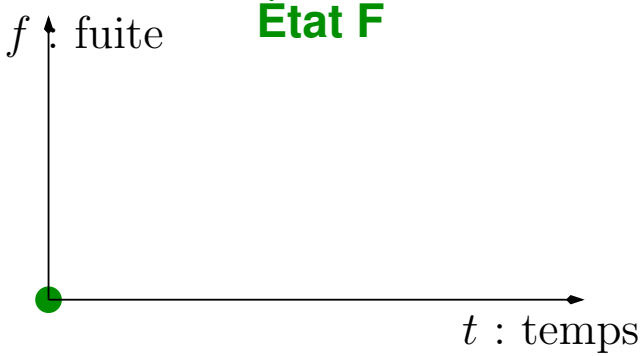


Le retour de la chaudière

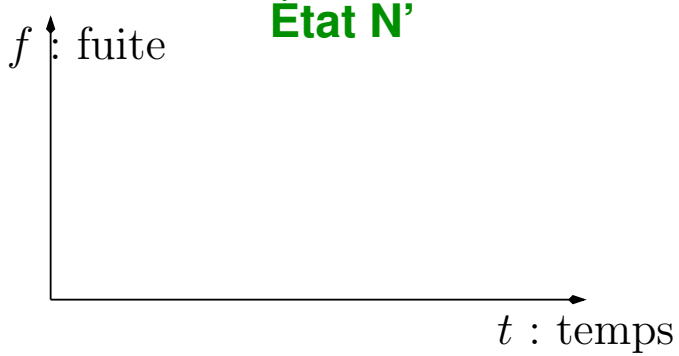


- $\tau_1^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 1, 1)$ tant que $x \leqslant 10$”
- $\tau_2^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 0, 1)$”

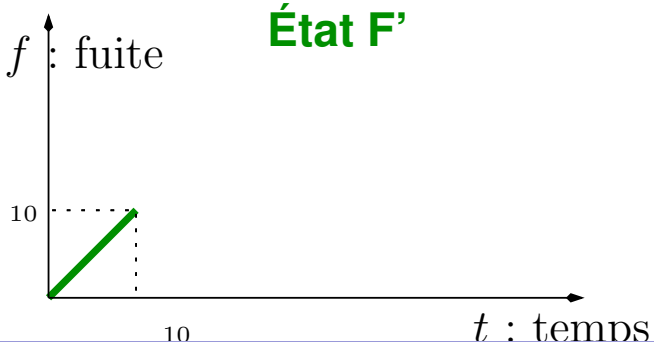
État F



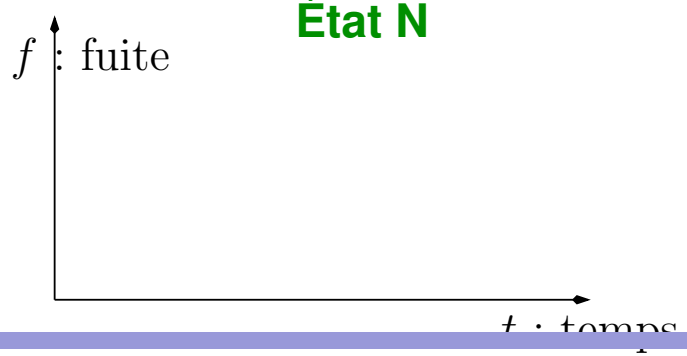
État N’



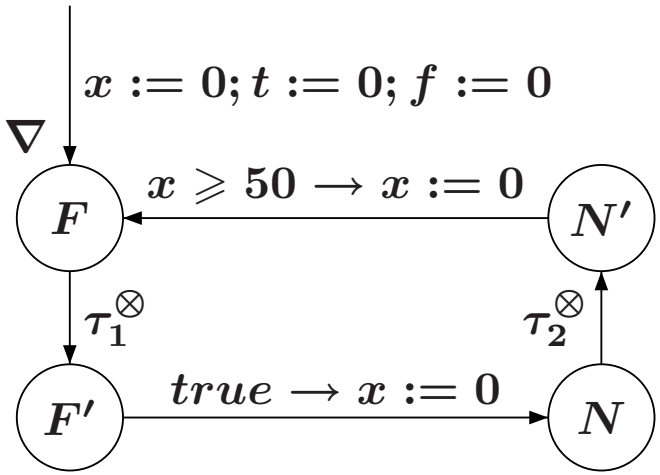
État F’



État N

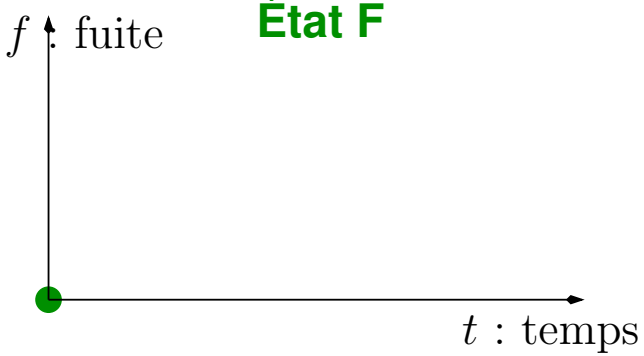


Le retour de la chaudière

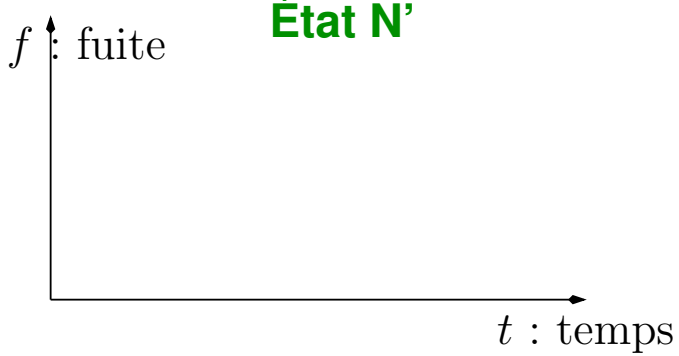


- $\tau_1^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 1, 1)$ tant que $x \leqslant 10$”
- $\tau_2^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 0, 1)$”

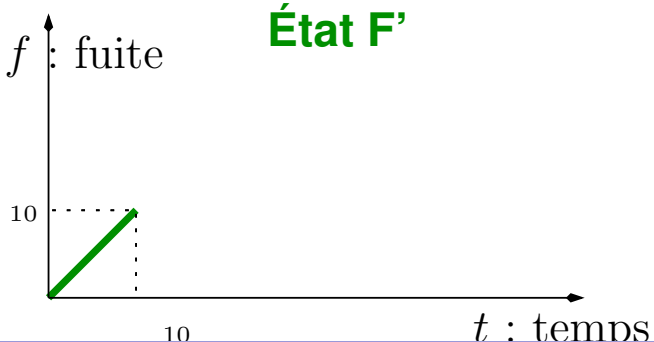
État F



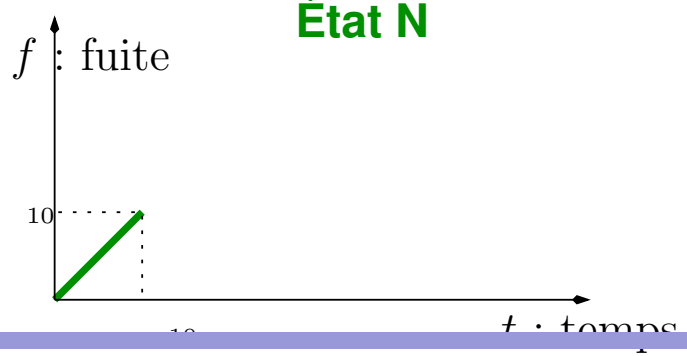
État N’



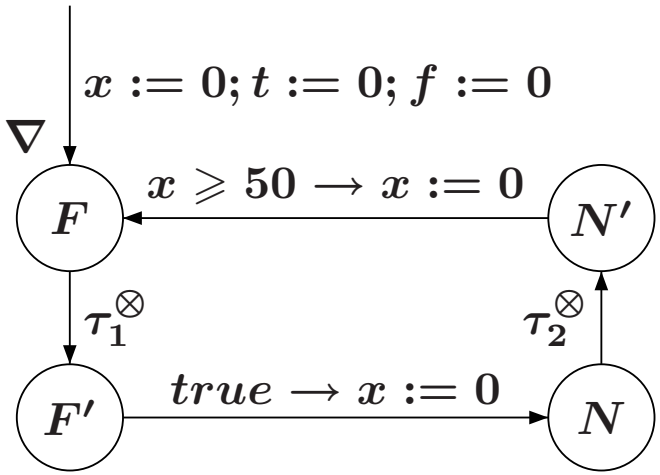
État F’



État N

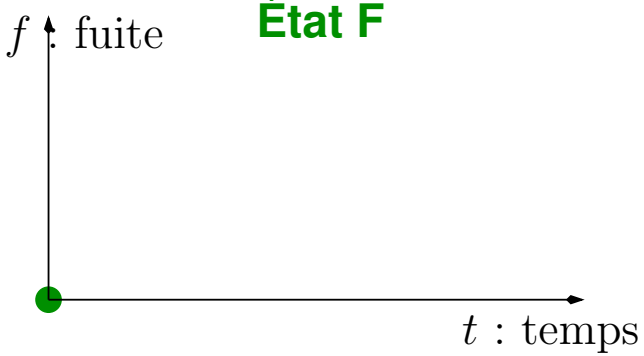


Le retour de la chaudière

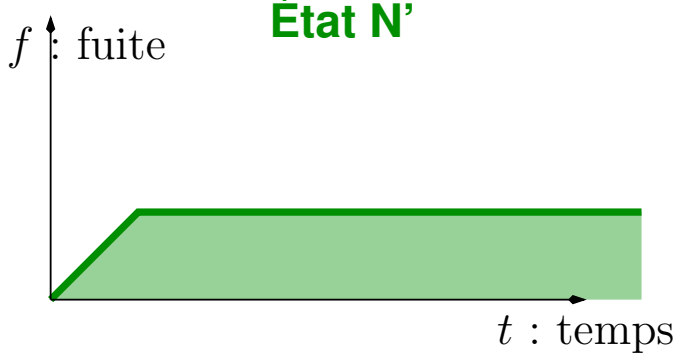


- $\tau_1^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 1, 1)$ tant que $x \leqslant 10$”
- $\tau_2^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 0, 1)$”

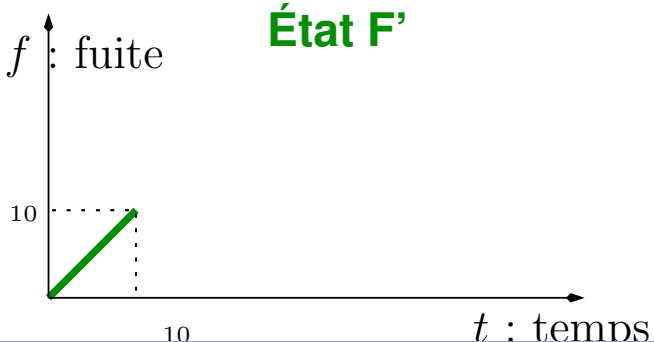
État F



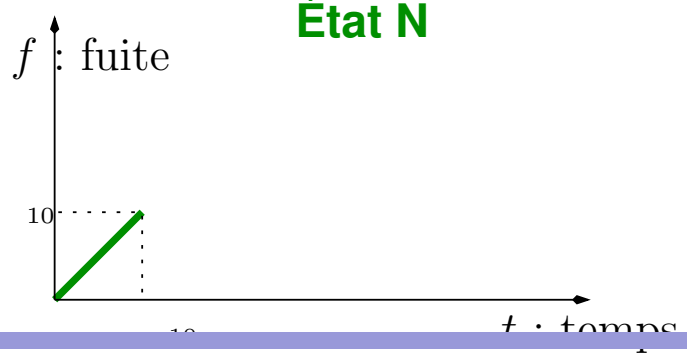
État N’



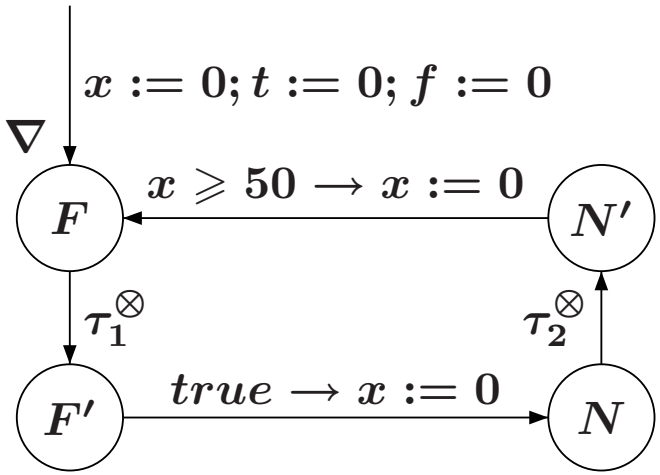
État F’



État N

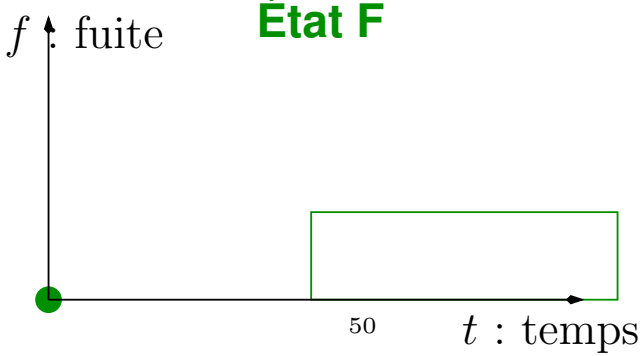


Le retour de la chaudière

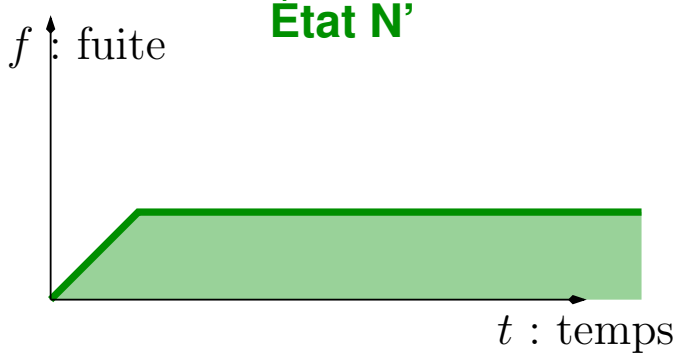


- $\tau_1^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 1, 1)$ tant que $x \leqslant 10$”
- $\tau_2^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 0, 1)$”

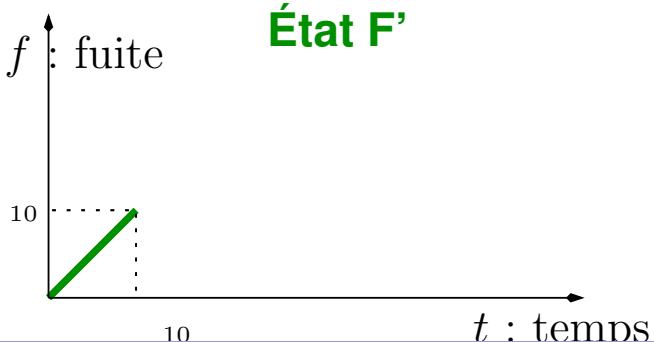
État F



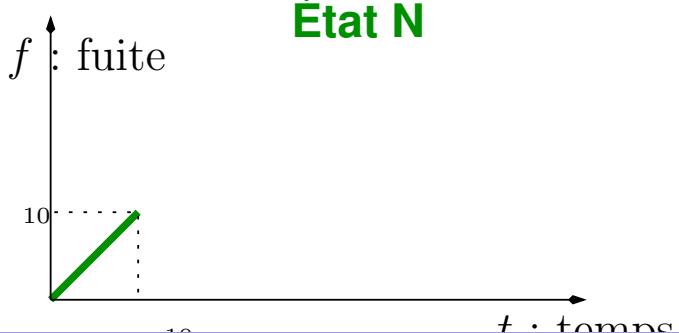
État N’



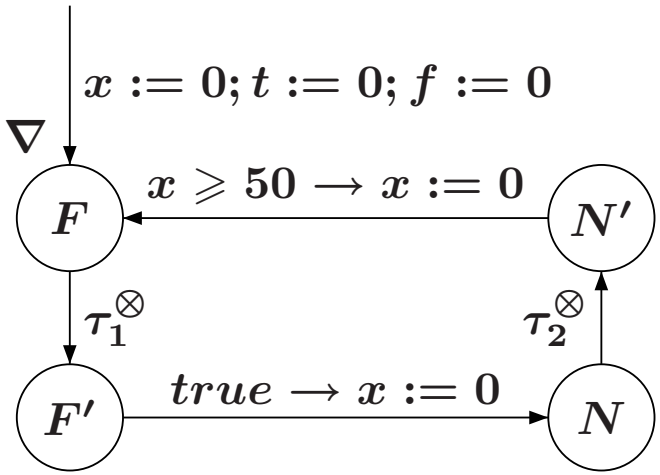
État F’



État N

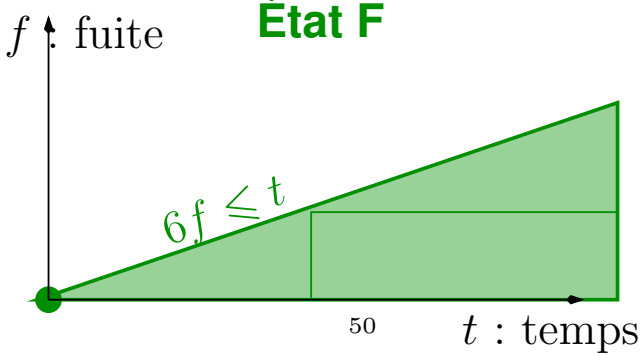


Le retour de la chaudière

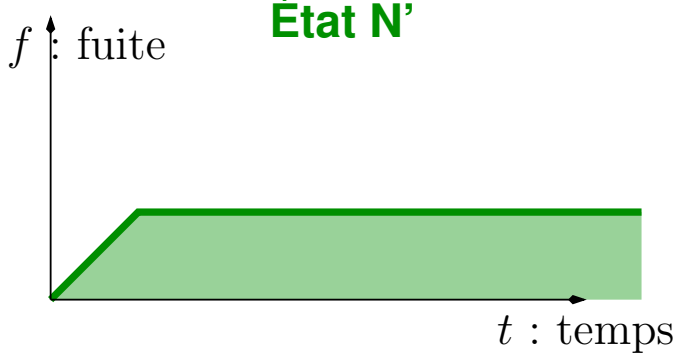


- $\tau_1^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 1, 1)$ tant que $x \leqslant 10$”
- $\tau_2^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 0, 1)$”

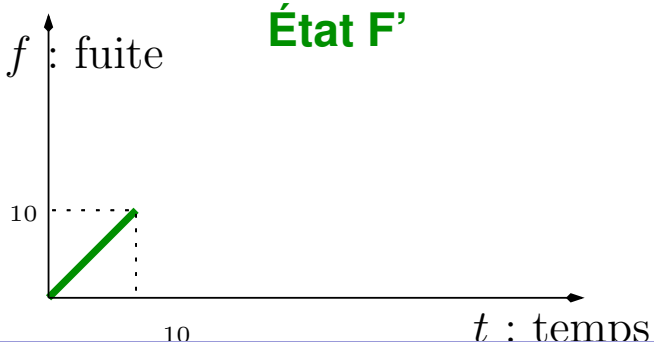
État F



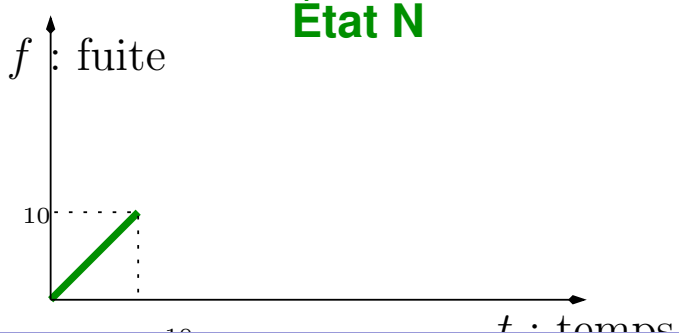
État N’



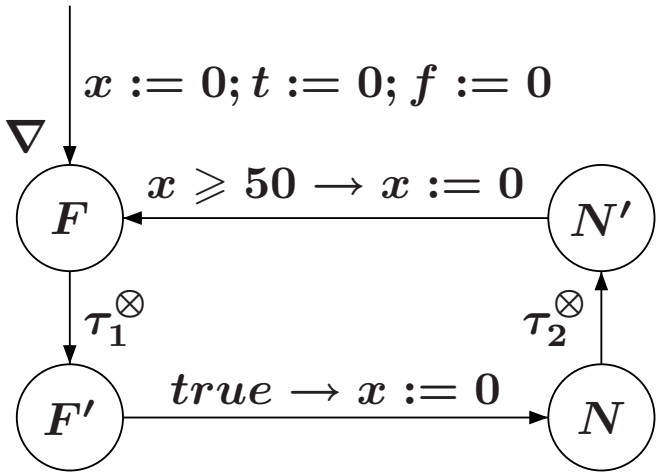
État F’



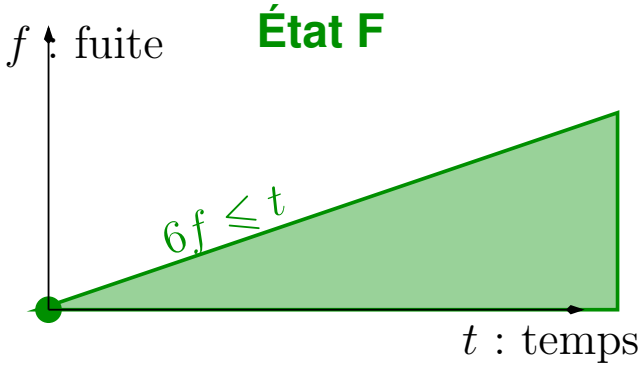
État N

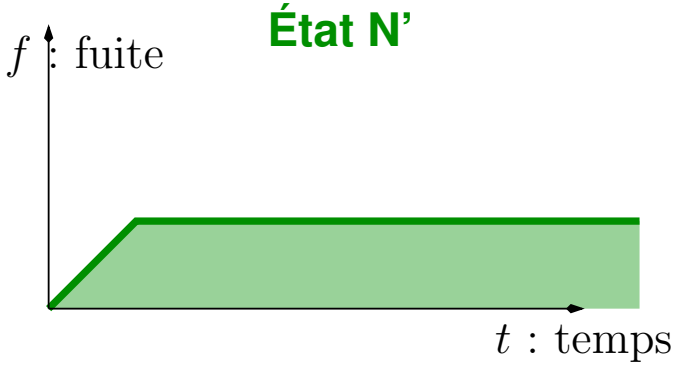


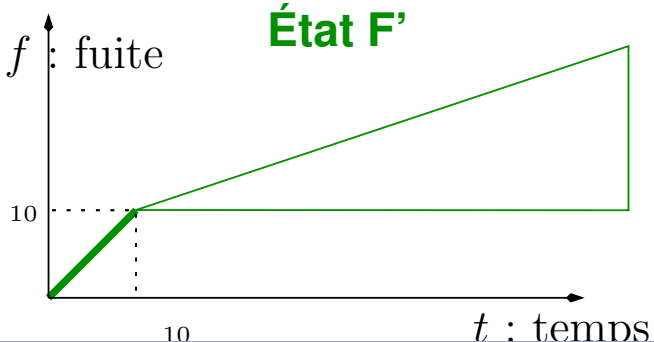
Le retour de la chaudière

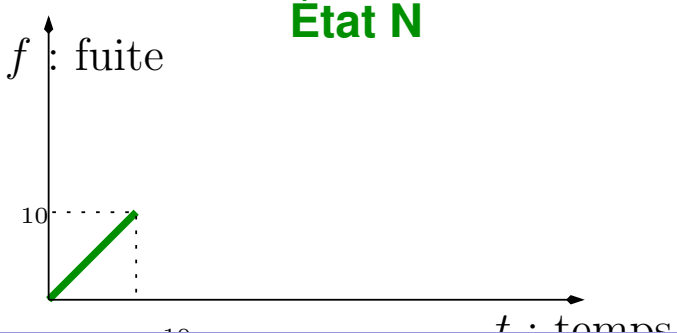


- $\tau_1^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 1, 1)$ tant que $x \leqslant 10$”
- $\tau_2^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 0, 1)$”

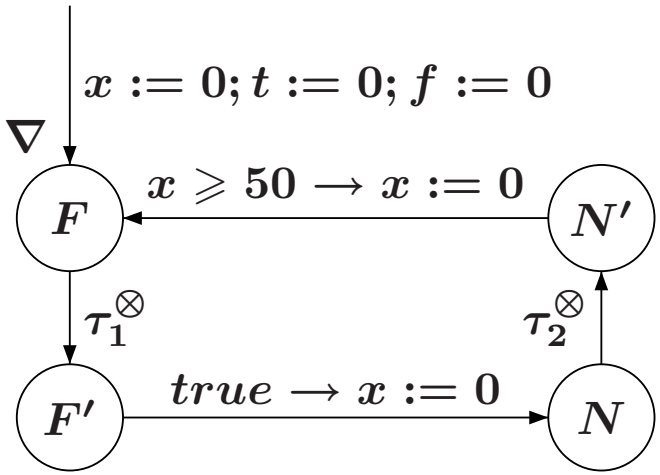






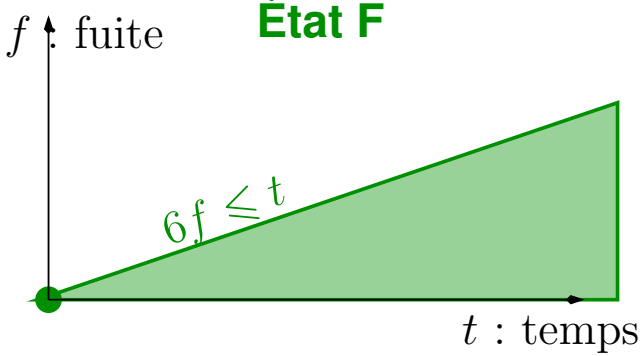


Le retour de la chaudière

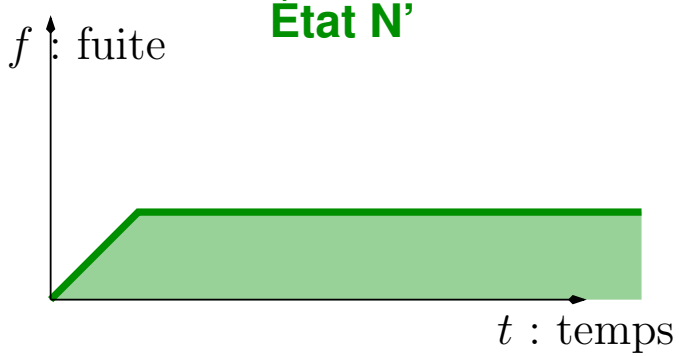


- $\tau_1^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 1, 1)$ tant que $x \leqslant 10$”
- $\tau_2^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 0, 1)$”

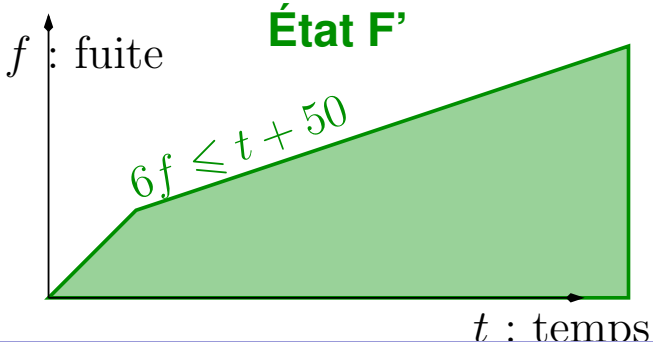
État F



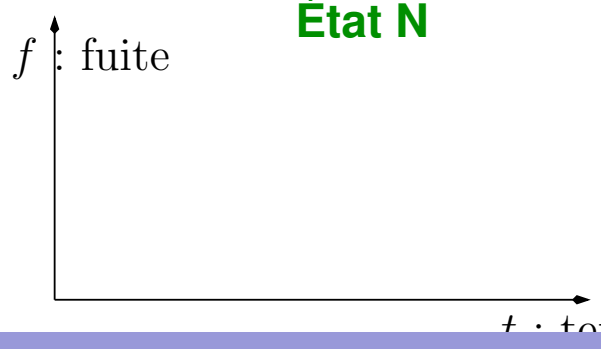
État N’



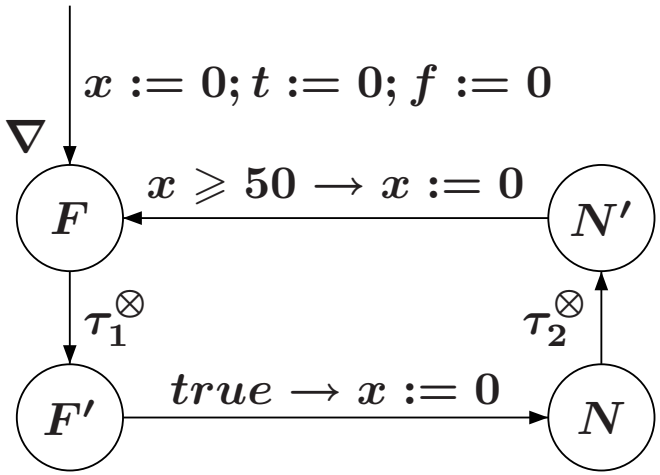
État F’



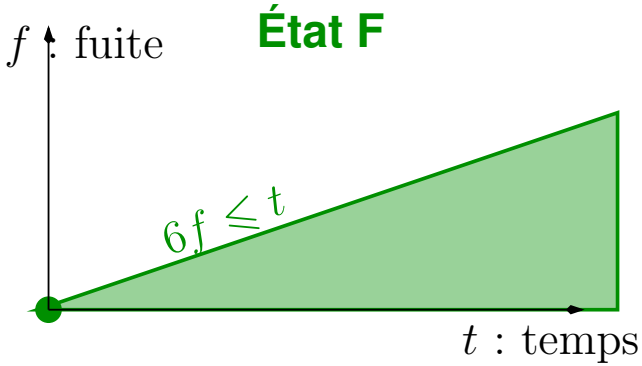
État N

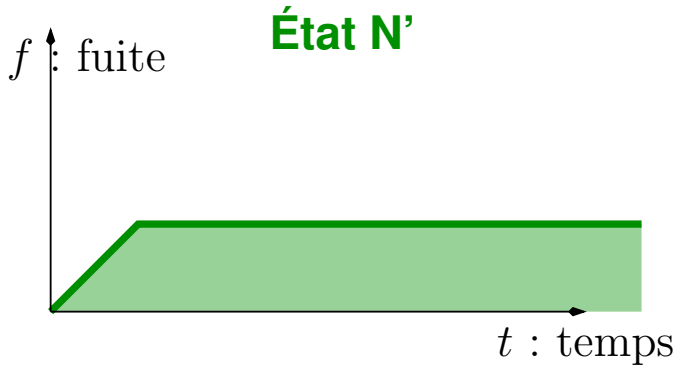


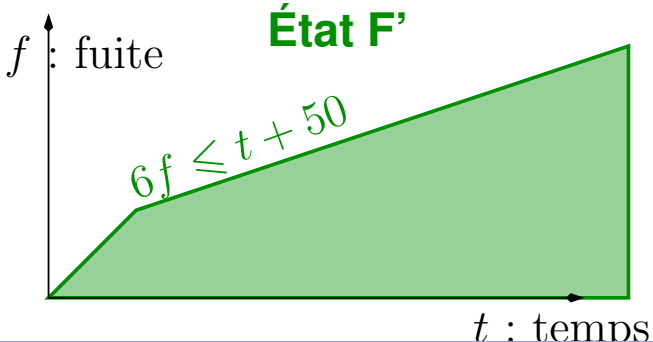
Le retour de la chaudière

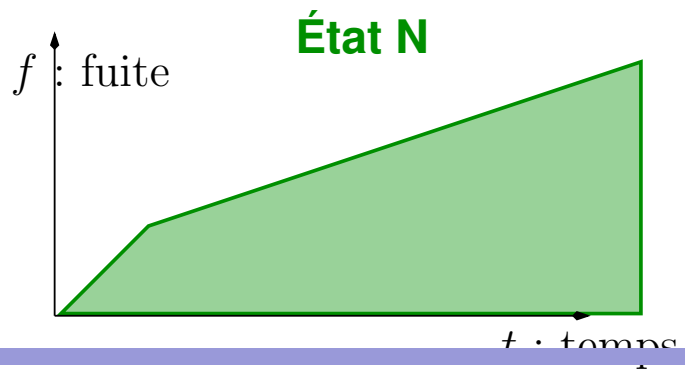


- $\tau_1^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 1, 1)$ tant que $x \leqslant 10$”
- $\tau_2^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 0, 1)$”

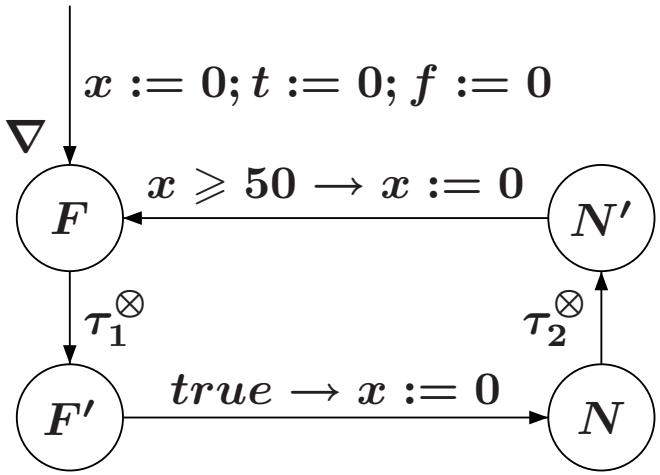




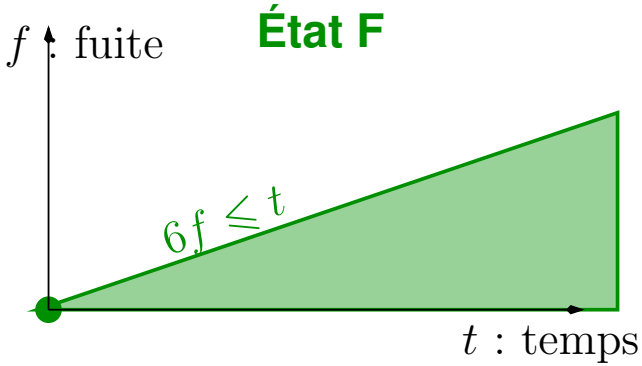


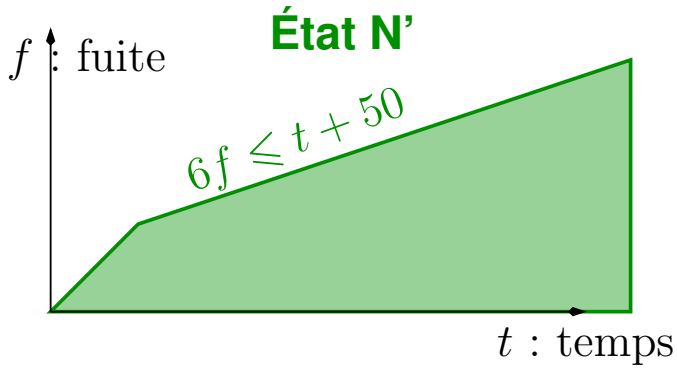


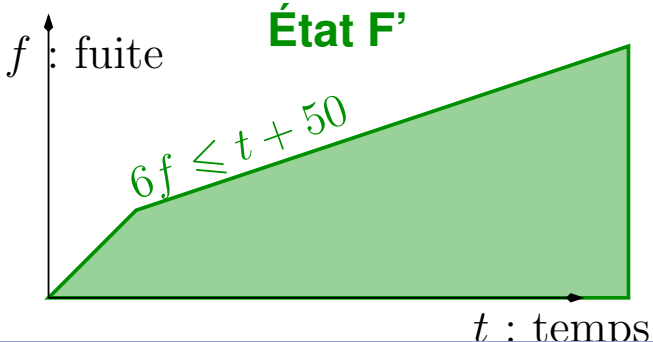
Le retour de la chaudière

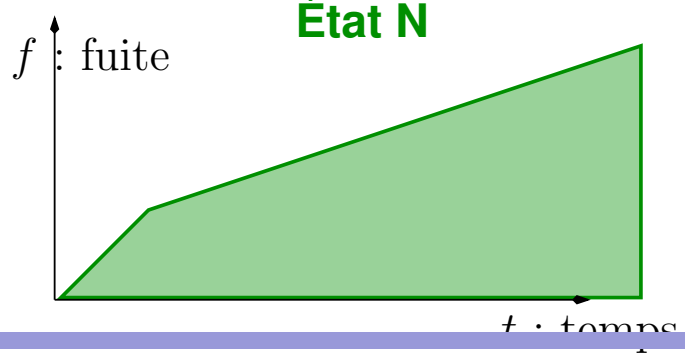


- $\tau_1^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 1, 1)$ tant que $x \leqslant 10$”
- $\tau_2^{\otimes}$ = “ajoute le rayon $(1, 0, 1)$”









Prototype développé : Aspic

ASPIC : Accelerated Symbolic Polyhedral Invariant Computation

- Un langage textuel d'automates (Fast) avec ou sans but de preuve (formule)
- Calcul classique + accélérations.
- Sorties : invariants + diagnostic.

Prototype développé : Aspic

ASPIC : Accelerated Symbolic Polyhedral Invariant Computation

- Un langage textuel d'automates (Fast) avec ou sans but de preuve (formule)
- Calcul classique + accélérations.
- Sorties : invariants + diagnostic.

▶ `http://laure.gonnord.org/pro/aspic/aspic.html`

Résultats expérimentaux

Quelques applications

- Accessibilité dans des automates à compteurs (sémantique de SystemC), une centaine de points de contrôle, J. Cornet.
- Propriétés numériques d'automates modélisant une consommation d'énergie de (réseaux de) capteurs, L. Samper et F. Maraninchi.
- Vérification de programmes manipulant des listes, R. Iosif et S. Perarnau.
- Vérification de programmes à pointeurs, A. Sangnier et A. Finkel.

Résultats expérimentaux

Quelques applications

- Accessibilité dans des automates à compteurs (sémantique de SystemC), une centaine de points de contrôle, J. Cornet.
- Propriétés numériques d'automates modélisant une consommation d'énergie de (réseaux de) capteurs, L. Samper et F. Maraninchi.
- Vérification de programmes manipulant des listes, R. Iosif et S. Perarnau.
- Vérification de programmes à pointeurs, A. Sangnier et A. Finkel.

▶ Cf ma thèse et le futur papier de journal.

Développement d'applications « resource-aware »

Le développeur a besoin d'outils pour :

- ajouter/retirer des fonctionalités aisément (compilation/exécution) ;
- adapter les fonctionnalités à la ressource physique (degraded modes) ;
- évaluer la performance (QoS).

Nos composants

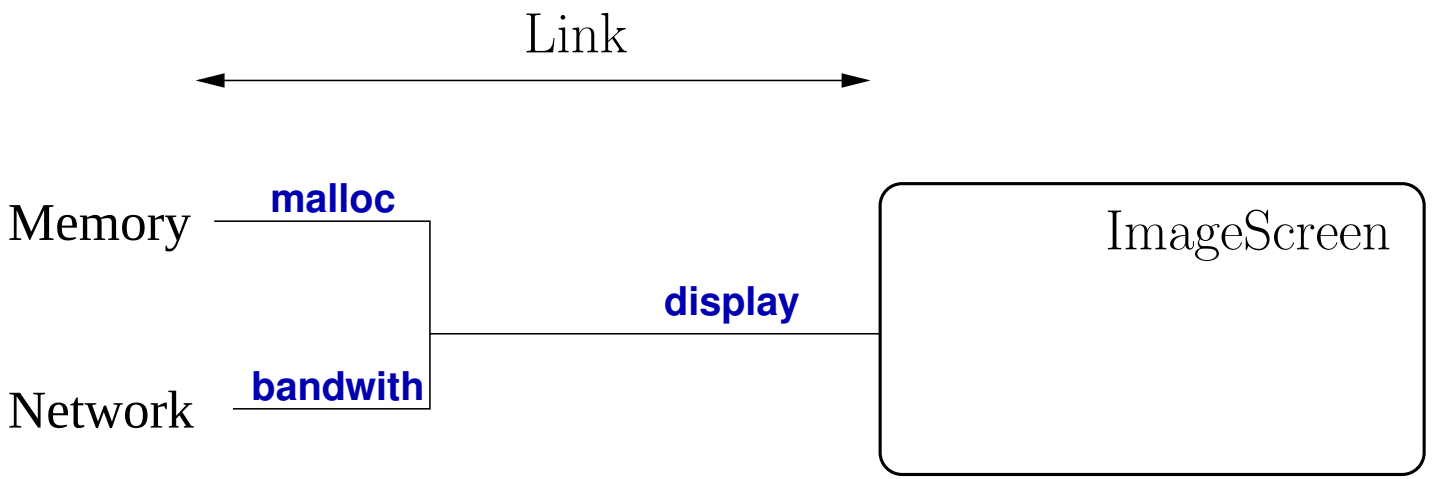
Caractéristiques

- Un composant fournit des **services** (fonctions, paramètres). Un service peut avoir des **requis** (services d'un autre composant).
- On distingue **type** de composant (mémoire,cpu,screen) et **instance** de composant.
- Notion de **liaison** entre les composants (services requis/fournis). Pas de mémoire partagée.

Composants, concepts pour la QoS (qualité de service)

Ressources variables :

- différentes implémentations des services selon la « qualité de service » (**niveau d'implémentation**)
- adaptation de ces implémentations par **contrat de liaison** (contrat = lien entre des parties).



Objectif

On veut **contractualiser des propriétés** des services :

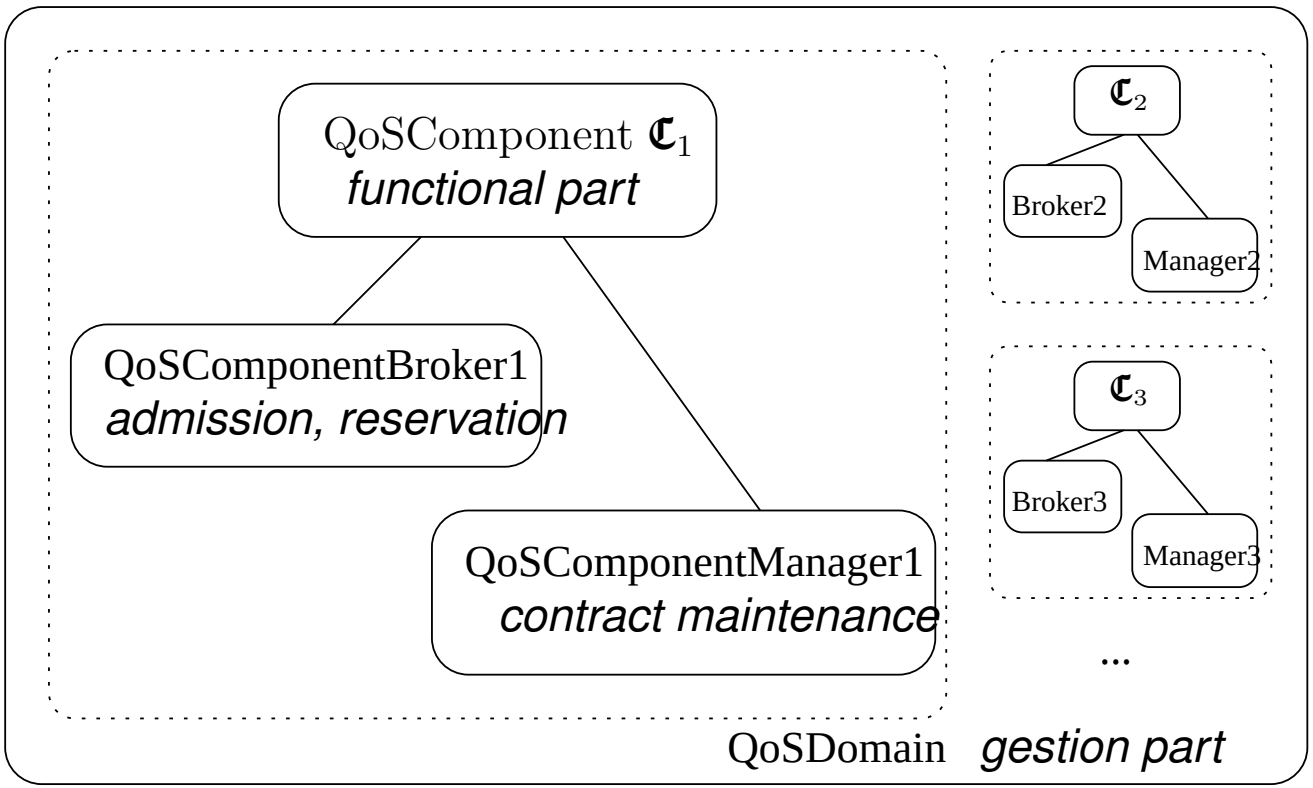
- Exprimer.
- Garantir.
- Négocier.

Les propriétés de qualité de service (QoS) portent sur les composants et les services, parlent de ressources (pas de délai pour le moment).

▶ Une **architecture** pour la gestion de la qualité de service (Qinna). [Babau/Tournier 2005]

Qinna en Bref - Architecture Logicielle

Une architecture logicielle dédiée à la gestion des problèmes de **Qualité de Service**. Nouveaux composants :



Travaux réalisés

- Formalisation du cadre existant, et extensions.
- Implémentation (C++).
- Génération automatique de contrôleurs de QoS.
- “Proof of concept”, développement d’une étude de cas.
- Livrable logiciel ANR.

Deux classes de propriétés

Nous avons identifié deux classes de propriétés (de QoS) :

- des propriétés sur **les services et les composants** (QoS Behavioural Constraints) : « la mémoire totale pour l'application est 4Mo », « le service `imagedisplay` est monoutilisateur », « ce composant ne peut être alloué que 3 fois », ...
- des propriétés sur les **liaisons** (QoS Linking Constraints) : « pour que le service `imagedisplay` soit rendu à qualité maximale, il faut que le réseau soit rapide et que le taux de compression soit faible »...

Formules sur les **paramètres** d'appels des services, sur la suite des **occurences** des services, ...

Contraintes de comportement de ressources (QBC)

- CTC : **contrainte de type** (nb total d'instances, ressource totale pour tous les services du composant, . . .) :

$$CTC(C) \stackrel{def}{=} \bigwedge_i CTC_{serv}(s_i) \wedge CTC_{compo}(C)$$

- CIC : **contrainte d'instance** (idem sur l'instance) :

$$CIC(C^j) \stackrel{def}{=} \bigwedge_i CIC_{serv}(s_i^j) \wedge CIC_{instance}(C^j)$$

(C : composant qui fournit le service s , C^j et s^j instances.)

Mise en œuvre des QBC dans Qinna++

Pour le (type) QoSComponent S, on crée un QoSBroker : les QBC seront garanties ·

- Le Broker fait l'allocation d'un composant uniquement si les CTC sont vérifiées (procédure de décision dans le Broker). Il initialise les contraintes d'instance (CIC).
- Le Broker sait décider si une instance de composant est en mesure de fournir un service à une quantité de service donnée.
- Après l'appel à un service, on lance `upgradeCIC` dans l'instance, et `upgradeCTC` dans le Broker.

Ressources bornées ▶ décision à **mémoire bornée.**
Génération automatique à partir d'une formule $\simeq MEDL$ [Lee 99]

Mise en œuvre des QLC dans Qinna++

Utilisation du composant QoSManager (pour S) ·

- Expression : une **table de liaison** lie les niveaux d'implémentation des services et de leurs requis.
- Lors de la réservation d'un service à une certaine qualité objectif, le Manager utilise les infos de la table pour établir (éventuellement) un **contrat**.

Réservation d'un service à un certain niveau de QoS/d'implémentation

Mise en place du **contrat de liaison** pour le service `Screen.displayimage()` (l'image existe) d'une l'instance à une QoS objectif .

- Le Broker est déjà initialisé (CTC), et une instance créée (CIC en partie). Si non CIC(s), échec.
- On demande le service avec le niveau de QoS == TBon (ie implLevel=1). Le Manager dit qu'il faut $20ko$ de mémoire : le service `Memory.malloc(20)` est demandé : si CIC et CTC ok, mémoire allouée.
- Contrat == `<display,1,malloc,20>`

▶ Réalisé **automatiquement** par les Managers de Qinna++.

Dégradation en cas d'échec

Deux notions :

- Les **niveaux d'implémentation** d'un service donné (ordonnés) : un contrat peut comporter un intervalle de niveaux d'implémentation objectifs acceptable.
- Les appels de services sont classés par **niveau d'importance**.

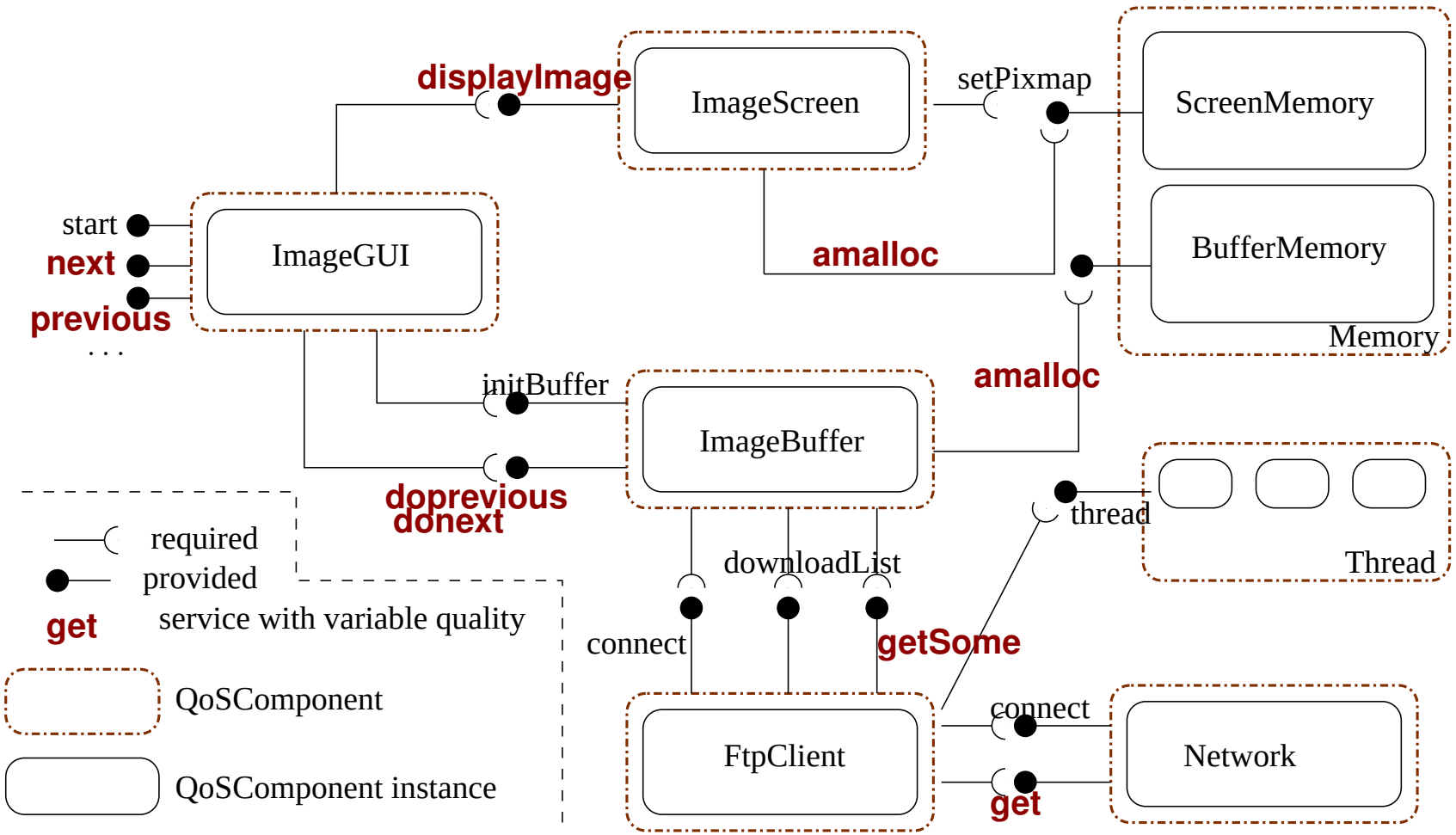
▶ Si la négociation échoue, on dégrade la QoS objectif (ie l'implémentation) d'un service de moindre importance.

Case study : description

- Contexte : Projet ANR REVE
- Téléchargement et visualisation d'images distantes par ftp.
- Adaptation du téléchargement et de l'affichage selon :
  - la mémoire disponible
  - la bande passante
- Évaluation de différentes politiques.

Case study : qinna-isation - 1

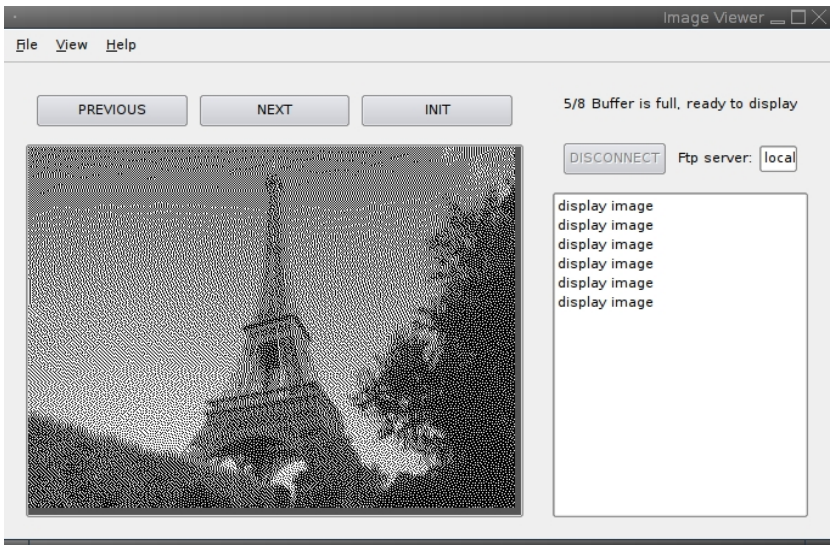
Step 1 : identify the variable services.

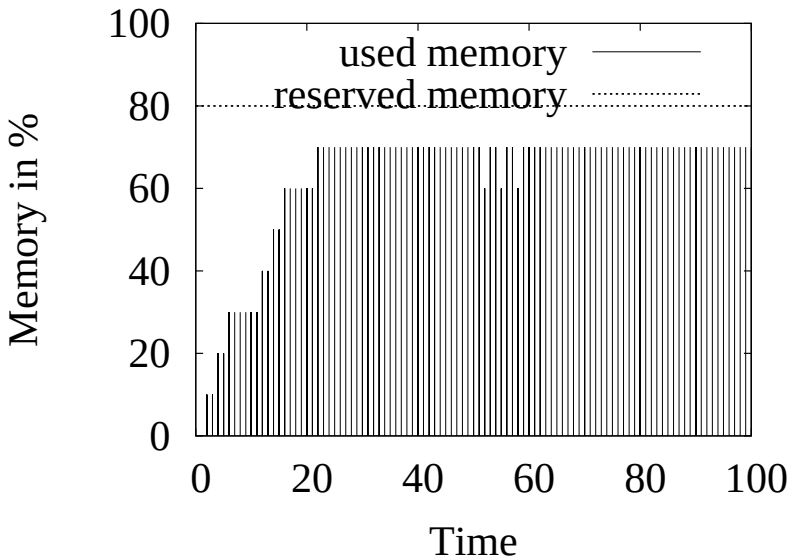


Case study : qinna-isation - 2

- Step 2 : Création des composants Qinna.
- Step 3 : Codage des constraints de liaison.
- Step 4 : Codage des contraintes de ressources.
- Step 5 : Initialisation et c'est tout !

Case study : évaluation





Conclusion et perspectives

Avantages de Qinna :

- ☺ Séparation des préoccupations (composants).
- ☺ Liens explicites entre les (QoS des) services (tables).
- ☺ Algorithmes de négociation et composants génériques.
- ☺ Distinctions entre classe/instance/service.
- ☺ Distinction entre contraintes numériques et contraintes de liaison.
- ☺ Mise en pratique simple.

Conclusion et perspectives

Avantages de Qinna :

- ☺ Séparation des préoccupations (composants).
- ☺ Liens explicites entre les (QoS des) services (tables).
- ☺ Algorithmes de négociation et composants génériques.
- ☺ Distinctions entre classe/instance/service.
- ☺ Distinction entre contraintes numériques et contraintes de liaison.
- ☺ Mise en pratique simple.

Mais

- ☹ Pas de découverte du « meilleur » vecteur de niveaux d'implémentation (synthèse de contrôleurs ?).
- ☹ Surcoût trop élevé (V1).

The End

Questions ?

`http://laure.gonnord.org/pro/`