Stabilité du réseau de distribution électrique – Analyse du point de vue automatique d'un système complexe

M. COSSON H. GUEGUEN G. MALARANGE D. DUMUR V.GABRION C. STOICA MANIU

Journée des doctorants de 2ème année – L2S

16 juin 2015

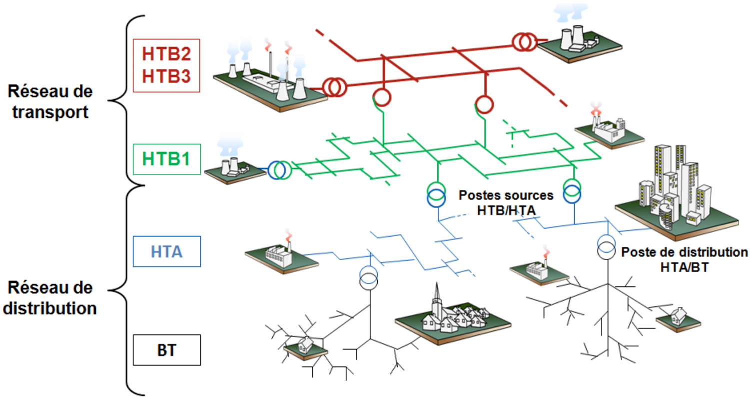
Plan

1. Contexte et objectifs de la thèse
2. Développement d'une méthode d'analyse de la stabilité
3. Application au cas d'étude : stabilité du réseau de distribution
4. Conclusion et perspectives

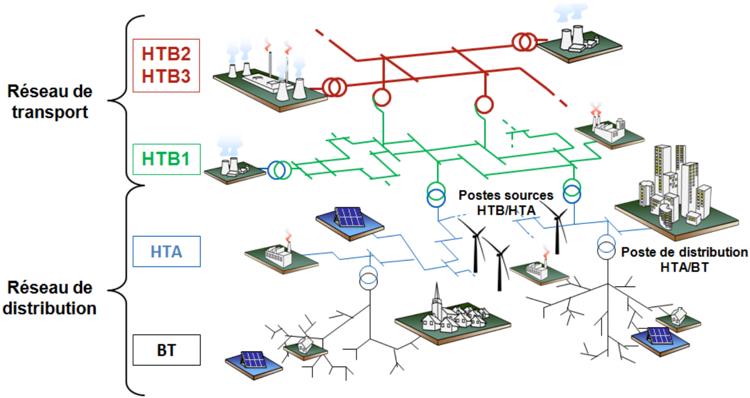
Plan

1. Contexte et objectifs de la thèse
2. Développement d'une méthode d'analyse de la stabilité
3. Application au cas d'étude : stabilité du réseau de distribution
4. Conclusion et perspectives

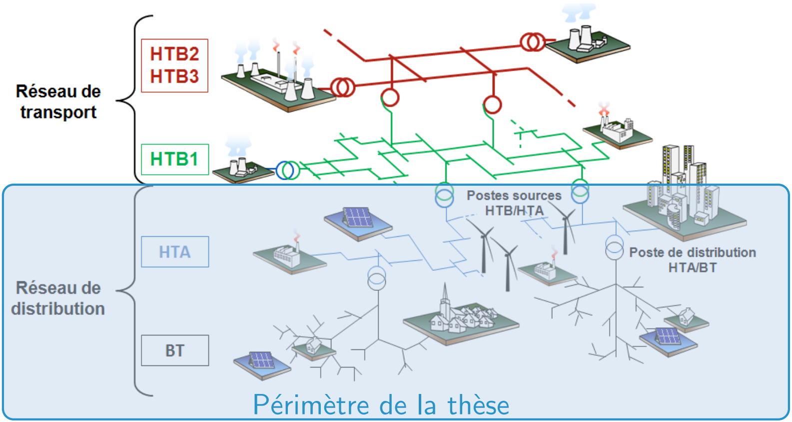
Qu'est ce que le réseau électrique de distribution ?



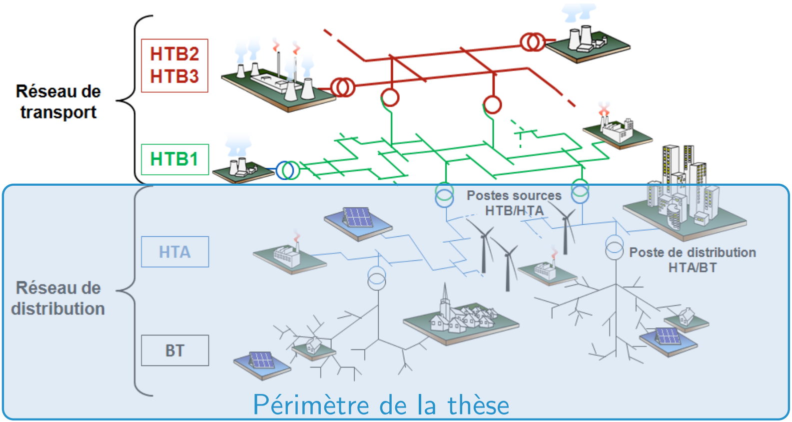
Qu'est ce que le réseau électrique de distribution ?



Qu'est ce que le réseau électrique de distribution ?



Qu’est ce que le réseau électrique de distribution ?



Nouveaux usages ⇒ Nouvelles contraintes

Quel est le rôle du gestionnaire de réseau de distribution ?

Rôles :

→ Maintenir la tension de ses clients dans les bornes légales,

→ ...

Moyens de réglage de la tension :

Aux postes de transformation HTB/HTA

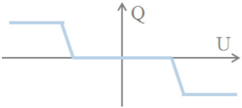
+ réglage statique au niveau des producteurs décentralisés

Problème : Limite fortement la croissance des énergies renouvelables

Ajouter un réglage dynamique et local de la tension des producteurs.

→ Multiplication des lois de régulation

→ Exemple : lois $Q(U)$



Quel est le rôle du gestionnaire de réseau de distribution ?

Rôles :

→ Maintenir la tension de ses clients dans les bornes légales,

→ ...

Moyens de réglage de la tension :

Aux postes de transformation HTB/HTA

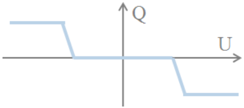
+ réglage statique au niveau des producteurs décentralisés

Problème : Limite fortement la croissance des énergies renouvelables

Ajouter un réglage dynamique et local de la tension des producteurs.

→ Multiplication des lois de régulation

→ Exemple : lois $Q(U)$



Quel est le rôle du gestionnaire de réseau de distribution ?

Rôles :

→ Maintenir la tension de ses clients dans les bornes légales,

→ ...

Moyens de réglage de la tension :

Aux postes de transformation HTB/HTA

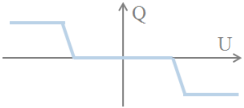
+ réglage statique au niveau des producteurs décentralisés

Problème : Limite fortement la croissance des énergies renouvelables

Ajouter un réglage dynamique et local de la tension des producteurs.

→ Multiplication des lois de régulation

→ Exemple : lois $Q(U)$



Quel est le rôle du gestionnaire de réseau de distribution ?

Rôles :

→ Maintenir la tension de ses clients dans les bornes légales,

→ ...

Moyens de réglage de la tension :

Aux postes de transformation HTB/HTA

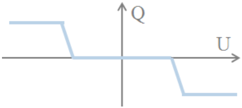
+ réglage statique au niveau des producteurs décentralisés

Problème : Limite fortement la croissance des énergies renouvelables

Ajouter un réglage dynamique et local de la tension des producteurs.

→ Multiplication des lois de régulation

→ Exemple : lois $Q(U)$



Quel est le rôle du gestionnaire de réseau de distribution ?

Rôles :

→ Maintenir la tension de ses clients dans les bornes légales,

→ ...

Moyens de réglage de la tension :

Aux postes de transformation HTB/HTA

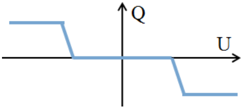
+ réglage statique au niveau des producteurs décentralisés

Problème : Limite fortement la croissance des énergies renouvelables

Ajouter un réglage dynamique et local de la tension des producteurs.

→ Multiplication des lois de régulation

→ Exemple : lois $Q(U)$



Problématique et objectifs de la thèse

Comment **régler les paramètres** des différentes **lois de régulation** pour assurer la **stabilité** des réseaux de distribution ?

1. Proposer une **méthode** pour étudier la **stabilité** d'**une** loi de régulation $\mathbf{Q}(\mathbf{U})$,
2. Étendre l'étude à **plusieurs producteurs**,
3. Étendre l'étude à **différentes lois de régulations**,

Objectif : Dégager des règles générales qui permettent d'assurer la stabilité des départs en toutes circonstances

Problématique et objectifs de la thèse

Comment **régler les paramètres** des différentes **lois de régulation** pour assurer la **stabilité** des réseaux de distribution ?

1. Proposer une **méthode** pour étudier la **stabilité** d'**une** loi de régulation $\mathbf{Q}(\mathbf{U})$,
2. Étendre l'étude à **plusieurs producteurs**,
3. Étendre l'étude à **différentes lois de régulations**,

Objectif : Dégager des règles générales qui permettent d'assurer la stabilité des départs en toutes circonstances

Problématique et objectifs de la thèse

Comment **régler les paramètres** des différentes **lois de régulation** pour assurer la **stabilité** des réseaux de distribution ?

1. Proposer une **méthode** pour étudier la **stabilité** d'**une** loi de régulation $\mathbf{Q}(\mathbf{U})$,
2. Étendre l'étude à **plusieurs producteurs**,
3. Étendre l'étude à **différentes lois de régulations**,

Objectif : Dégager des règles générales qui permettent d'assurer la stabilité des départs en toutes circonstances

Problématique et objectifs de la thèse

Comment **régler les paramètres** des différentes **lois de régulation** pour assurer la **stabilité** des réseaux de distribution ?

1. Proposer une **méthode** pour étudier la **stabilité** d'**une** loi de régulation $\mathbf{Q}(\mathbf{U})$,
2. Étendre l'étude à **plusieurs producteurs**,
3. Étendre l'étude à **différentes lois de régulations**,

Objectif : Dégager des règles générales qui permettent d'assurer la stabilité des départs en toutes circonstances

Plan

1. Contexte et objectifs de la thèse
2. Développement d'une méthode d'analyse de la stabilité
3. Application au cas d'étude : stabilité du réseau de distribution
4. Conclusion et perspectives

Insuffisance des méthodes usuelles

But :

Étudier la **stabilité** d'un système non-linéaire **affine par morceaux** dont la dynamique est à **temps discret**.

$\Rightarrow$ Dans la littérature, on propose de construire une fonction de Lyapunov MAIS ne permet pas de conclure à l'instabilité.

Étudier les **trajectoires** pour avoir des informations sur les **conditions initiales** menant à un **fonctionnement instable**.

Problème : Il existe une **infinité** de trajectoires possibles.

Méthode : Construire un automate discret à partir du système pour en étudier plus simplement les trajectoires.

Insuffisance des méthodes usuelles

But :

Étudier la **stabilité** d'un système non-linéaire **affine par morceaux** dont la dynamique est à **temps discret**.

$\Rightarrow$ Dans la littérature, on propose de construire une fonction de Lyapunov MAIS ne permet pas de conclure à l'instabilité.

Étudier les **trajectoires** pour avoir des informations sur les **conditions initiales** menant à un **fonctionnement instable**.

Problème : Il existe une **infinité** de trajectoires possibles.

Méthode : Construire un automate discret à partir du système pour en étudier plus simplement les trajectoires.

Insuffisance des méthodes usuelles

But :

Étudier la **stabilité** d'un système non-linéaire **affine par morceaux** dont la dynamique est à **temps discret**.

$\Rightarrow$ Dans la littérature, on propose de construire une fonction de Lyapunov MAIS ne permet pas de conclure à l'instabilité.

Étudier les **trajectoires** pour avoir des informations sur les **conditions initiales** menant à un **fonctionnement instable**.

Problème : Il existe une **infinité** de trajectoires possibles.

Méthode : Construire un automate discret à partir du système pour en étudier plus simplement les trajectoires.

Insuffisance des méthodes usuelles

But :

Étudier la **stabilité** d'un système non-linéaire **affine par morceaux** dont la dynamique est à **temps discret**.

$\Rightarrow$ Dans la littérature, on propose de construire une fonction de Lyapunov MAIS ne permet pas de conclure à l'instabilité.

Étudier les **trajectoires** pour avoir des informations sur les **conditions initiales** menant à un **fonctionnement instable**.

Problème : Il existe une **infinité** de trajectoires possibles.

Méthode : Construire un automate discret à partir du système pour en étudier plus simplement les trajectoires.

Insuffisance des méthodes usuelles

But :

Étudier la **stabilité** d'un système non-linéaire **affine par morceaux** dont la dynamique est à **temps discret**.

$\Rightarrow$ Dans la littérature, on propose de construire une fonction de Lyapunov MAIS ne permet pas de conclure à l'instabilité.

Étudier les **trajectoires** pour avoir des informations sur les **conditions initiales** menant à un **fonctionnement instable**.

Problème : Il existe une **infinité** de trajectoires possibles.

Méthode : Construire un automate discret à partir du système pour en étudier plus simplement les trajectoires.

Construction de l'abstraction discrète

Modélisation dynamique affine par morceaux à temps discret de vecteur d'état $x_k \in \mathcal{X}$:

n_R zones "affines" $\Rightarrow$ Domaine de validité : $\mathcal{D}_i = \{x \in \mathcal{X} \mid K_i x \leq L_i\}$
Dynamique associée : $x_{k+1} = A_i x_k + b_i \ \forall x_k \in \mathcal{D}_i$

SYSTÈME DE TRANSITIONS HYBRIDE

$$S_H =< \mathfrak{Q}, Inv, Dyn >$$

avec :

- $\mathfrak{Q}$ = ensemble des modes $(q_i)_{i=1,\cdots,n_R}$
- Inv : $\begin{array}{ccc} \mathfrak{Q} & \rightarrow & 2^{\mathcal{X}} \\ q_i & \mapsto & \mathcal{D}_i \end{array}$
- Dyn : $\begin{array}{ccc} \mathfrak{Q} & \rightarrow & (\mathcal{A} \times \mathcal{B}) \\ q_i & \mapsto & [A_i \ \ b_i] \end{array}$

AUTOMATE DISCRET

$$S_D =< \mathfrak{M}, T >$$

avec :

- $\mathfrak{M}$ = ensemble d'états discrets $(m_i)_{i=1,\cdots,n_R}$ avec Φ telle que $m_i = \Phi(\mathcal{D}_i)$
- $T : \mathfrak{M}^2 \rightarrow \{0, 1\}$ telle que $T(m_i, m_j) = 1 \Leftrightarrow \exists x \in \mathcal{D}_i : (A_i x + b_i) \in \mathcal{D}_j$

Construction de l'abstraction discrète

Modélisation dynamique affine par morceaux à temps discret de vecteur d'état $x_k \in \mathcal{X}$:

n_R zones "affines" $\Rightarrow$ Domaine de validité : $\mathcal{D}_i = \{x \in \mathcal{X} \mid K_i x \leq L_i\}$
Dynamique associée : $x_{k+1} = A_i x_k + b_i \ \forall x_k \in \mathcal{D}_i$

SYSTÈME DE TRANSITIONS HYBRIDE

$$S_H = < \mathfrak{Q}, Inv, Dyn >$$

avec :

- $\mathfrak{Q}$ = ensemble des modes $(q_i)_{i=1,\cdots,n_R}$
- Inv : $\begin{array}{ccc} \mathfrak{Q} & \rightarrow & 2^{\mathcal{X}} \\ q_i & \mapsto & \mathcal{D}_i \end{array}$
- Dyn : $\begin{array}{ccc} \mathfrak{Q} & \rightarrow & (\mathcal{A} \times \mathcal{B}) \\ q_i & \mapsto & [A_i \ \ b_i] \end{array}$

AUTOMATE DISCRET

$$S_D = < \mathfrak{M}, T >$$

avec :

- $\mathfrak{M}$ = ensemble d'états discrets $(m_i)_{i=1,\cdots,n_R}$ avec Φ telle que $m_i = \Phi(\mathcal{D}_i)$
- $T : \mathfrak{M}^2 \rightarrow \{0,1\}$ telle que $T(m_i, m_j) = 1 \Leftrightarrow \exists x \in \mathcal{D}_i : (A_i x + b_i) \in \mathcal{D}_j$

Construction de l'abstraction discrète

Modélisation dynamique affine par morceaux à temps discret de vecteur d'état $x_k \in \mathcal{X}$:

n_R zones "affines" $\Rightarrow$ Domaine de validité : $\mathcal{D}_i = \{x \in \mathcal{X} \mid K_i x \leq L_i\}$
Dynamique associée : $x_{k+1} = A_i x_k + b_i \; \forall x_k \in \mathcal{D}_i$

SYSTÈME DE TRANSITIONS HYBRIDE

$$S_H = < \mathfrak{Q}, Inv, Dyn >$$

avec :

- $\mathfrak{Q}$ = ensemble des modes $(q_i)_{i=1,\cdots,n_R}$
- Inv : $\begin{array}{ccc} \mathfrak{Q} & \rightarrow & 2^{\mathcal{X}} \\ q_i & \mapsto & \mathcal{D}_i \end{array}$
- Dyn : $\begin{array}{ccc} \mathfrak{Q} & \rightarrow & (\mathcal{A} \times \mathcal{B}) \\ q_i & \mapsto & [A_i \;\; b_i] \end{array}$

AUTOMATE DISCRET

$$S_D = < \mathfrak{M}, T >$$

avec :

- $\mathfrak{M}$ = ensemble d'états discrets $(m_i)_{i=1,\cdots,n_R}$ avec Φ telle que $m_i = \Phi(\mathcal{D}_i)$
- $T : \mathfrak{M}^2 \rightarrow \{0,1\}$ telle que $T(m_i, m_j) = 1 \Leftrightarrow \exists x \in \mathcal{D}_i : (A_i x + b_i) \in \mathcal{D}_j$

Définition de la stabilité

Quelques notions utiles :

- $Post_{S_H}(x) = Dyn(q).\,[x \;\; 1]^T$ avec $q \in \mathfrak{Q}$ et $x \in Inv(q)$
- $Pre_{S_H}(x) = \{x' \in \mathcal{X} \mid x = Dyn(q).\,[x' \;\; 1]^T$ avec $q \in \mathfrak{Q} : \; x' \in Inv(q)\}$

Définition de la stabilité :

$$\text{Stable} \Leftrightarrow \forall x \in \mathcal{X},\; \exists n \in \mathbb{N} : \; \forall k \geq n,\; Post^k_{S_H}(x) \in Inv(q_{i_n})$$

avec i_n tel que $Post^n_{S_H}(x) \in Inv(q_{i_n})$

$\Longrightarrow$ Analyse des trajectoires de l'automate discret pour étudier les trajectoires du système de transitions hybride.

Stabilité de l'automate discret $\underset{\nLeftarrow}{\Rightarrow}$ Stabilité du système hybride

Définition de la stabilité

Quelques notions utiles :

- $Post_{S_H}(x) = Dyn(q).\,[x \;\; 1]^T$ avec $q \in \mathfrak{Q}$ et $x \in Inv(q)$
- $Pres_{S_H}(x) = \{x' \in \mathcal{X} \mid x = Dyn(q).\,[x' \;\; 1]^T$ avec $q \in \mathfrak{Q} : \; x' \in Inv(q)\}$

Définition de la stabilité :

$$\text{Stable} \Leftrightarrow \forall x \in \mathcal{X},\; \exists n \in \mathbb{N} : \; \forall k \geq n,\; Post^k_{S_H}(x) \in Inv(q_{i_n})$$

avec i_n tel que $Post^n_{S_H}(x) \in Inv(q_{i_n})$

$\Longrightarrow$ Analyse des trajectoires de l'automate discret pour étudier les trajectoires du système de transitions hybride.

Stabilité de l'automate discret $\underset{\not\Leftarrow}{\Rightarrow}$ Stabilité du système hybride

Définition de la stabilité

Quelques notions utiles :

- $Post_{S_H}(x) = Dyn(q).\,[x \;\; 1]^T$ avec $q \in \mathfrak{Q}$ et $x \in Inv(q)$
- $Pres_{S_H}(x) = \{x' \in \mathcal{X} \mid x = Dyn(q).\,[x' \;\; 1]^T$ avec $q \in \mathfrak{Q} : \; x' \in Inv(q)\}$

Définition de la stabilité :

$$\text{Stable} \Leftrightarrow \forall x \in \mathcal{X},\; \exists n \in \mathbb{N} : \; \forall k \geq n,\; Post^k_{S_H}(x) \in Inv(q_{i_n})$$

avec i_n tel que $Post^n_{S_H}(x) \in Inv(q_{i_n})$

$\Rightarrow$ Analyse des trajectoires de l'automate discret pour étudier les trajectoires du système de transitions hybride.

Stabilité de l'automate discret $\overset{\Rightarrow}{\not\Leftarrow}$ Stabilité du système hybride

Définition de la stabilité

Quelques notions utiles :

- $Post_{S_H}(x) = Dyn(q).\left[x \;\; 1\right]^T$ avec $q \in \mathfrak{Q}$ et $x \in Inv(q)$
- $Pres_{S_H}(x) = \{x' \in \mathcal{X} \mid x = Dyn(q).\left[x' \;\; 1\right]^T$ avec $q \in \mathfrak{Q} : \; x' \in Inv(q)\}$

Définition de la stabilité :

$$\text{Stable} \Leftrightarrow \forall x \in \mathcal{X}, \; \exists n \in \mathbb{N} : \; \forall k \geq n, \; Post^k_{S_H}(x) \in Inv(q_{i_n})$$

avec i_n tel que $Post^n_{S_H}(x) \in Inv(q_{i_n})$

$\Longrightarrow$ Analyse des trajectoires de l'automate discret pour étudier les trajectoires du système de transitions hybride.

$$\boxed{\text{Stabilité de l'automate discret} \;\; \begin{array}{c}\Rightarrow \\ \not\Leftarrow\end{array} \;\; \text{Stabilité du système hybride}}$$

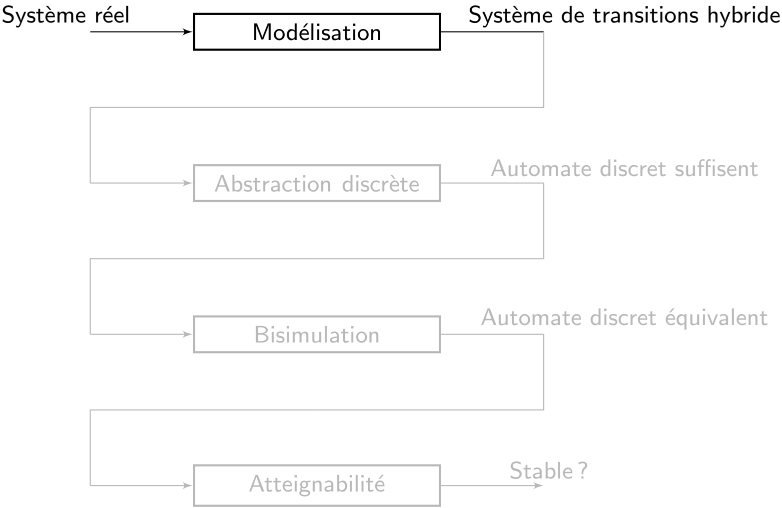
Raffinement de l'abstraction discrète

<u>But</u> : Stabilité de l'automate discret $\Leftrightarrow$ Stabilité du système hybride

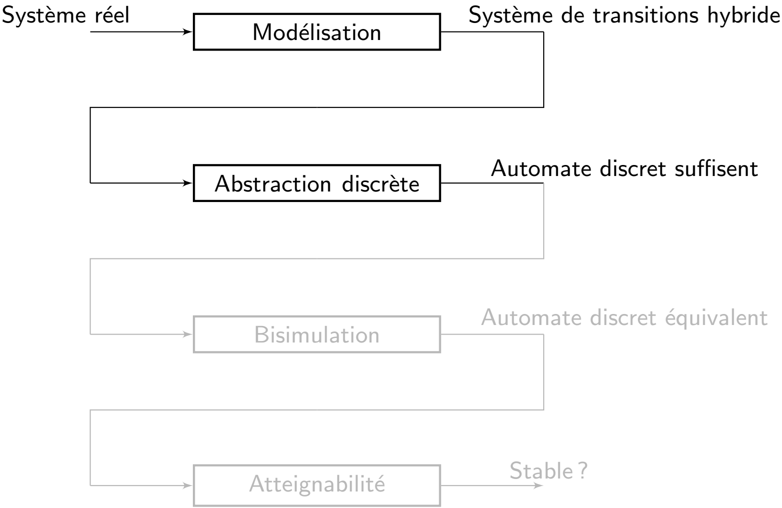
Algorithme de bisimulation : affiner la division P_a de l'espace d'état $\mathcal{X}$ pour avoir **une seule** transition possible à partir d'un état discret m.

Initialisation;
while $\overline{EndFlag}$ **do**
  $P_a^{n+1} \leftarrow P_a^n$; $n = n + 1$;
  for *chaque domaine* $d_i \subset P_a^n(\mathcal{X})$ **do**
    dest $\leftarrow$ Ensemble des destinations possibles de d_i;
    for *chaque domaine* $d_j \subset dest$ **do**
      $d_1 \leftarrow$ Sous-partie de d_i menant à d_j;
      $d_2 \leftarrow$ Reste de d_i;
      Actualiser la nouvelle fonction de transition;
      $P_a^{n+1} = (P_a^{n+1} \backslash d_i) \cap \{d_1;\ d_2\}$;
    end
  end
  EndFlag $\leftarrow$ ($P_a^{n+1}(\mathcal{X})$ permet-il de conclure sur la stabilité ?);
end

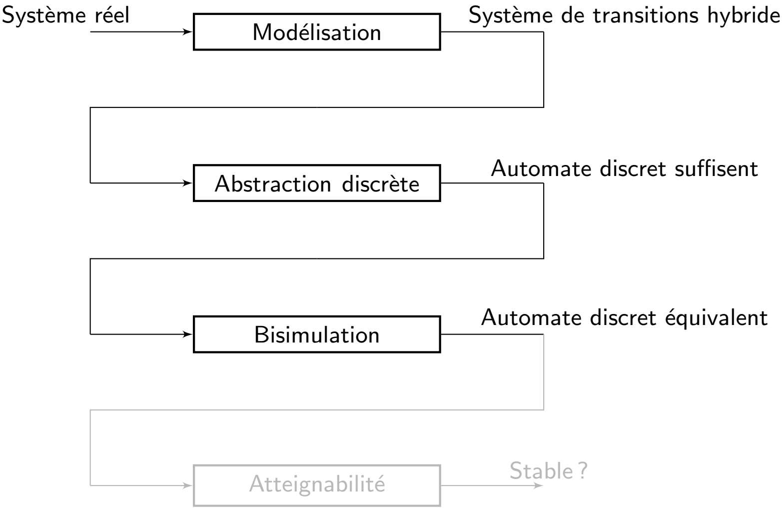
Conclusion


Système réel
Modélisation
Système de transitions hybride
Abstraction discrète
Automate discret suffisent
Bisimulation
Automate discret équivalent
Atteignabilité
Stable ?

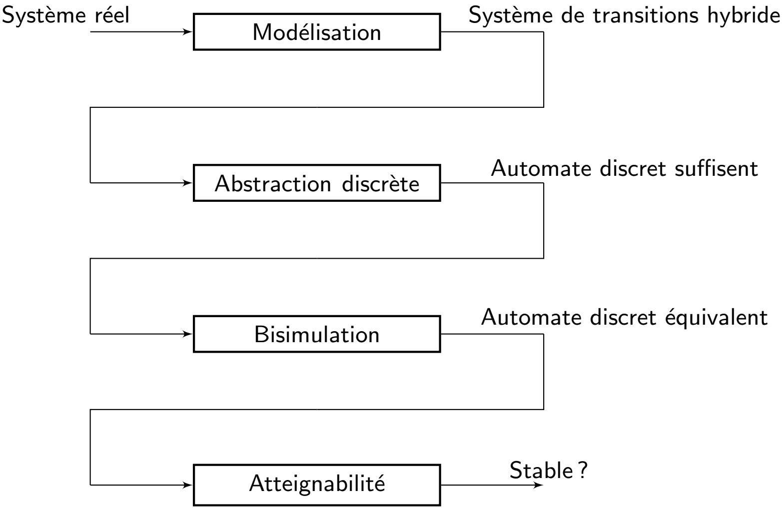
Conclusion


Système réel
Modélisation
Système de transitions hybride
Abstraction discrète
Automate discret suffisent
Bisimulation
Automate discret équivalent
Atteignabilité
Stable ?

Conclusion


Système réel
Modélisation
Système de transitions hybride
Abstraction discrète
Automate discret suffisent
Bisimulation
Automate discret équivalent
Atteignabilité
Stable ?

Conclusion

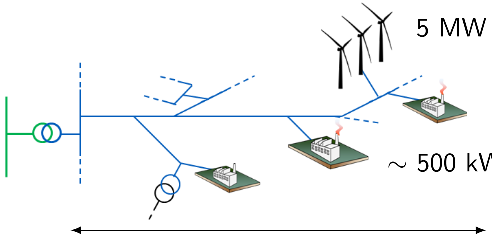

Système réel
Modélisation
Système de transitions hybride
Abstraction discrète
Automate discret suffisent
Bisimulation
Automate discret équivalent
Atteignabilité
Stable ?

Plan

1. Contexte et objectifs de la thèse
2. Développement d'une méthode d'analyse de la stabilité
3. Application au cas d'étude : stabilité du réseau de distribution
4. Conclusion et perspectives

Présentation du cas étudié

Description du réseau réel moyenne-tension étudié :



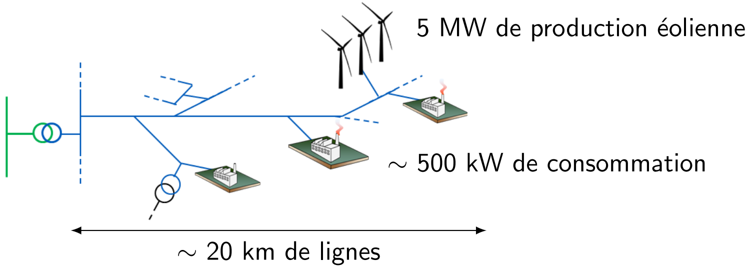
Aujourd'hui : Problèmes de surtension sur le départ

Ajouter une régulation de la puissance réactive en fonction de la tension au niveau de la ferme éolienne.

$\Rightarrow$ Quel impact sur la stabilité ?

Présentation du cas étudié

Description du réseau réel moyenne-tension étudié :



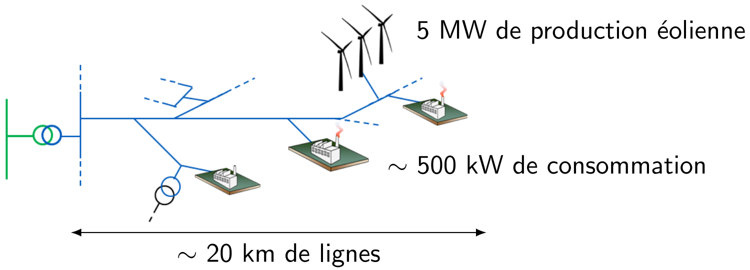
Aujourd'hui : Problèmes de surtension sur le départ

Ajouter une régulation de la puissance réactive en fonction de la tension au niveau de la ferme éolienne.

$\Rightarrow$ Quel impact sur la stabilité ?

Présentation du cas étudié

Description du réseau réel moyenne-tension étudié :



Aujourd'hui : Problèmes de surtension sur le départ

Ajouter une régulation de la puissance réactive en fonction de la tension au niveau de la ferme éolienne.

⇒ Quel impact sur la stabilité ?

Modélisation sous forme de système de transition hybride

Mise en équations :

Réseau : $\Delta U_{DG_k} = K_Q \Delta Q_{DG_k} + \Delta U_p$

Filtre de mesure : $\begin{cases} x_{k+1} = \Delta U_{DG_k} \\ \Delta U^f_{DG_k} = x_k \end{cases}$

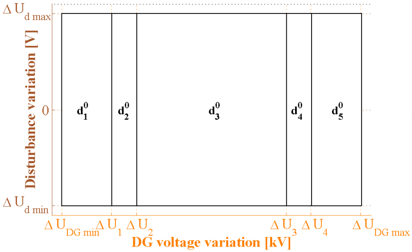
Loi $Q(U)$: $\Delta Q_{DG_k} = \alpha_i \Delta U^f_{DG_k} + \beta_i$
avec $i \in \{1, \cdots, 5\}$, $\Delta U_i^- \leq \Delta U^f_{DG_k} \leq \Delta U_i^+$

Finalement 5 zones de fonctionnement affine définies par :

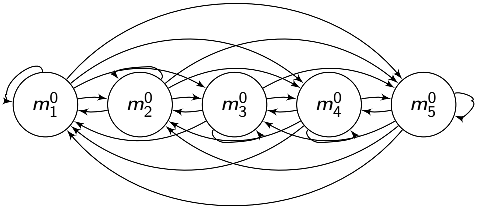
- un domaine de validité $\mathcal{D}_i = \left\{ x \in \mathcal{X} \middle| \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \Delta U^f_{DG_k} \leq \begin{bmatrix} \Delta U_i^+ \\ -\Delta U_i^- \end{bmatrix} \right\}$
- une dynamique affine $x_{k+1} = A_i x_k + b_i$

Abstraction discrète

Système Hybride S_H :



Système Discret S_D^0 :



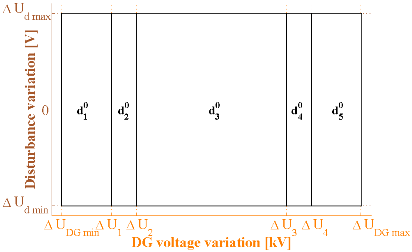
Peut on conclure sur la stabilité de S_H ?

- S_D^0 est-il stable ? **NON**
- S_D^0 est-il équivalent à S_H ? **NON**

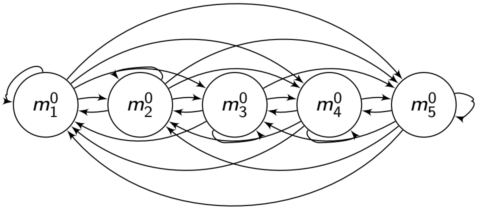
⇒ Éliminer des trajectoires discretes "infaisables" par bisimulation

Abstraction discrète

Système Hybride S_H :



Système Discret S_D^0 :



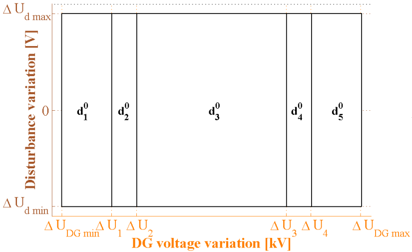
Peut on conclure sur la stabilité de S_H ?

- S_D^0 est-il stable ? **NON**
- S_D^0 est-il équivalent à S_H ? **NON**

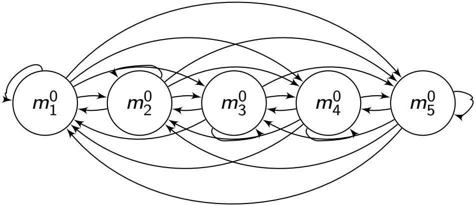
⇒ Éliminer des trajectoires discretes "infaisables" par bisimulation

Abstraction discrète

Système Hybride S_H :



Système Discret S_D^0 :



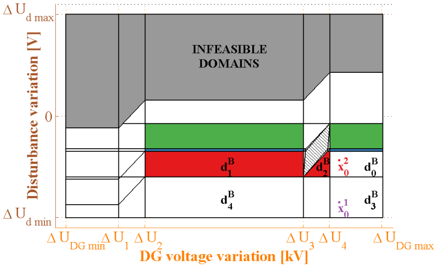
Peut on conclure sur la stabilité de S_H ?

- S_D^0 est-il stable ? **NON**
- S_D^0 est-il équivalent à S_H ? **NON**

$\Rightarrow$ Éliminer des trajectoires discretes "infaisables" par bisimulation

Conlcusion

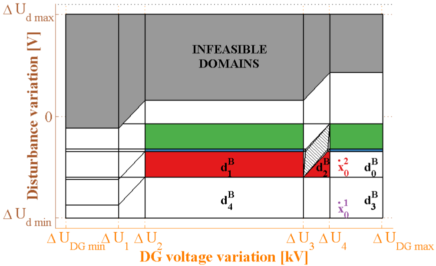
Après 1 itération :



⇒ On ne peut toujours pas conclure

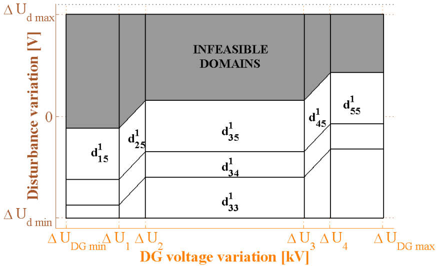
Conlcusion

Après 1 itération :



⇒ On ne peut toujours pas conclure

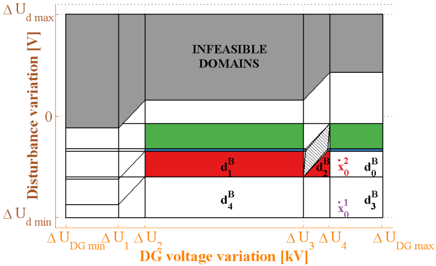
Après 3 itérations :



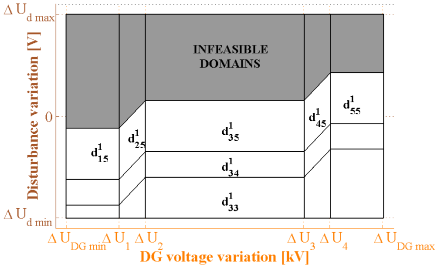
⇒ On peut conclure avant la convergence

Conlcusion

Après 1 itération :



Après 3 itérations :



⇒ On ne peut toujours pas conclure

⇒ On peut conclure avant la convergence

⇒ $\boxed{\text{Le système est instable}}$

Plan

1. Contexte et objectifs de la thèse
2. Développement d'une méthode d'analyse de la stabilité
3. Application au cas d'étude : stabilité du réseau de distribution
4. Conclusion et perspectives

Conclusion – Perspectives

On a :

- développer un **outil** d'analyse de la **stabilité** et de l'**instabilité** d'un système non-linéaire mais **affine par morceaux**.
- appliqué cet outil à l'analyse de la stabilité d'un **départ électrique**.

Perspectives :

→ Passage à l'**échelle**

→ Prise en compte des **interactions** entre différentes régulations

→ Mise en évidence des **paramètres déterminant pour la stabilité** des réseaux électriques

→ Établissement de **lois générales de réglage des paramètres** des régulations

Merci de votre attention

Avez vous des questions ?