



Réseau de transport d'électricité



Protection des réseaux à courant continu de forte puissance

Justine Descloux
RTE-CNER-DCCL G2Elab

IEEE PES – Chapitre Français
Soirée Doctorants

10-02-2012

Projet européen

- FP7 EC-G n°249812
- Fin mars 2013

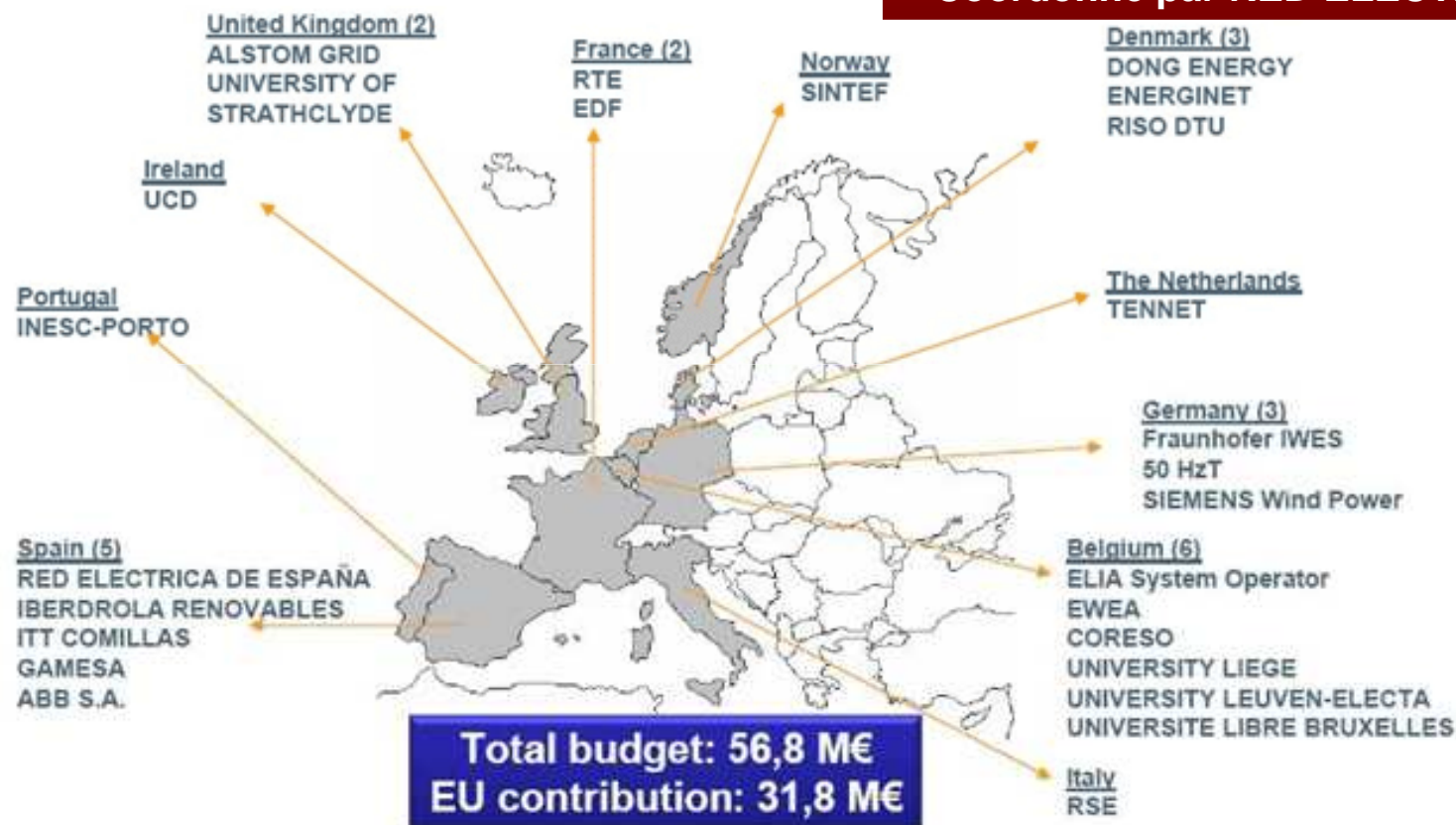
Objectifs

- Développer une gestion innovante pour intégrer l'énergie éolienne à grande échelle dans les réseaux électriques européens

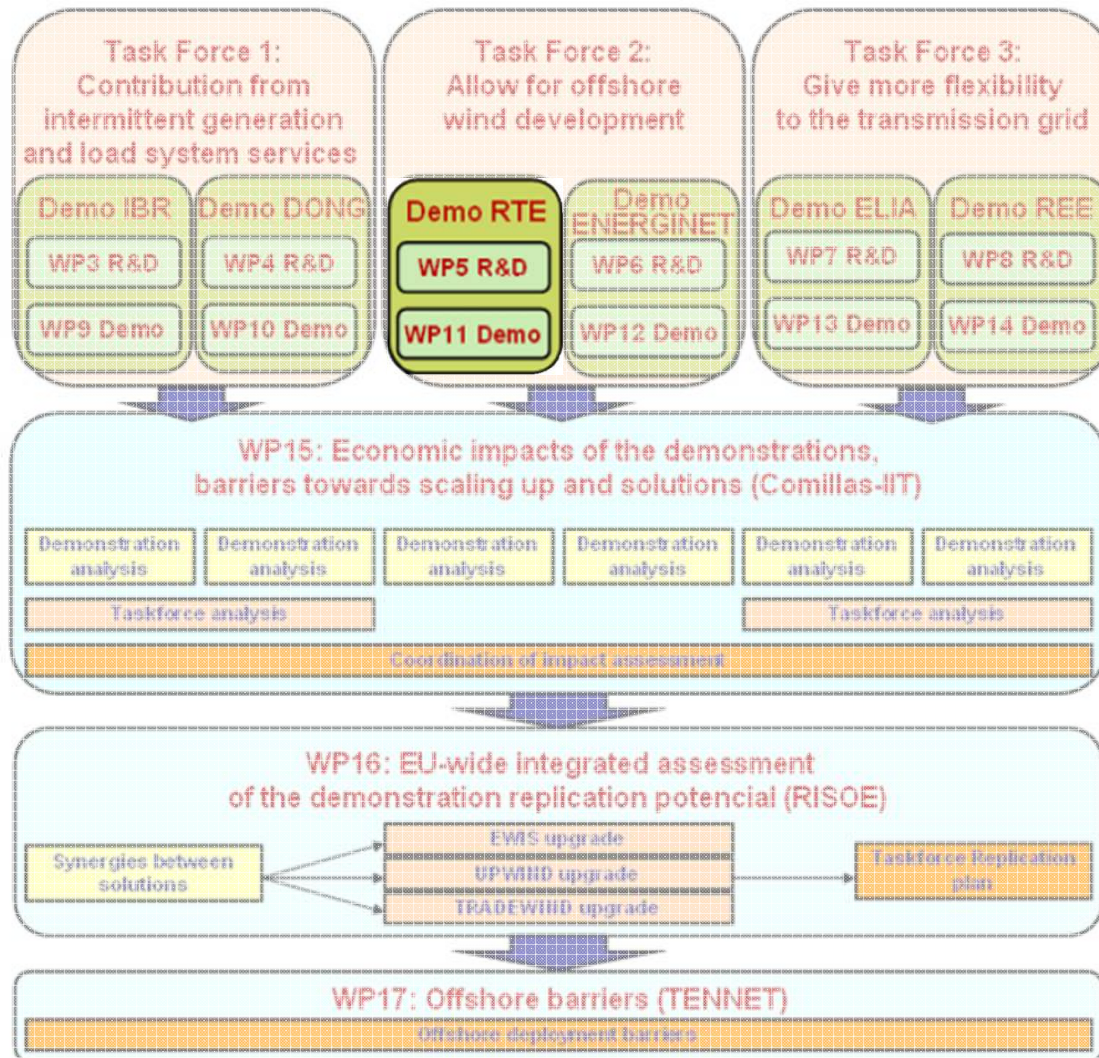


- Essais en laboratoire et en conditions réelles (démonstrateurs)
- 18 groupes de travail

- 26 partenaires
- 10 états membres représentés
- Coordonné par RED ELECTRICA DE ESPAÑA



Source: <http://www.twenties-project.eu>



RTE

- Étude de la faisabilité technique et économique des réseaux offshore à courant continu
- WP5 – WP11

Source: <http://www.twenties-project.eu>

WP11 – DC GRID

- Spécifier le contrôle et la stratégie pour un réseau DC
- Effectuer des tests à échelle réduite
- Vérifier la sécurité d'un réseau HVDC, avec des disjoncteurs DC
- Déterminer les spécifications sur un disjoncteur DC par des mesures sur un prototype
- Construire un plan de développement à 5 ans sur la technologie HVDC
- Construire un plan de développement à 20 ans sur la conception de réseau HVDC

2 thèses



Protections
Justine Descloux

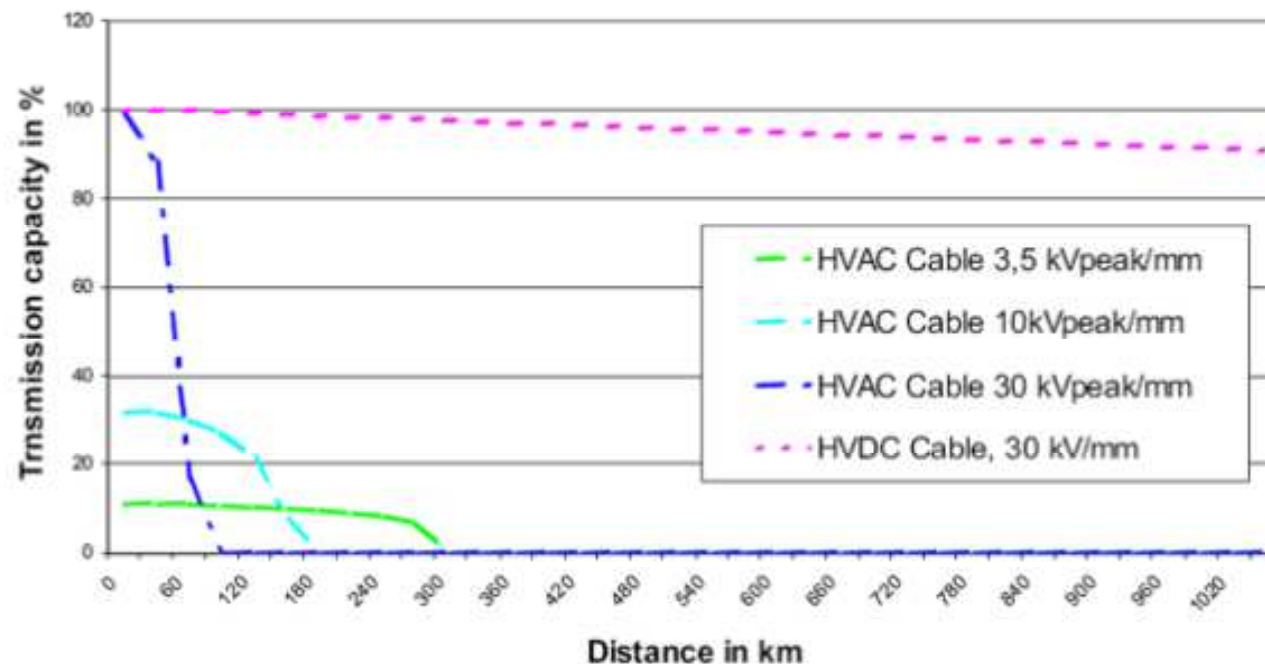
Contrôle commande
Pierre Rault



Liaisons HVDC

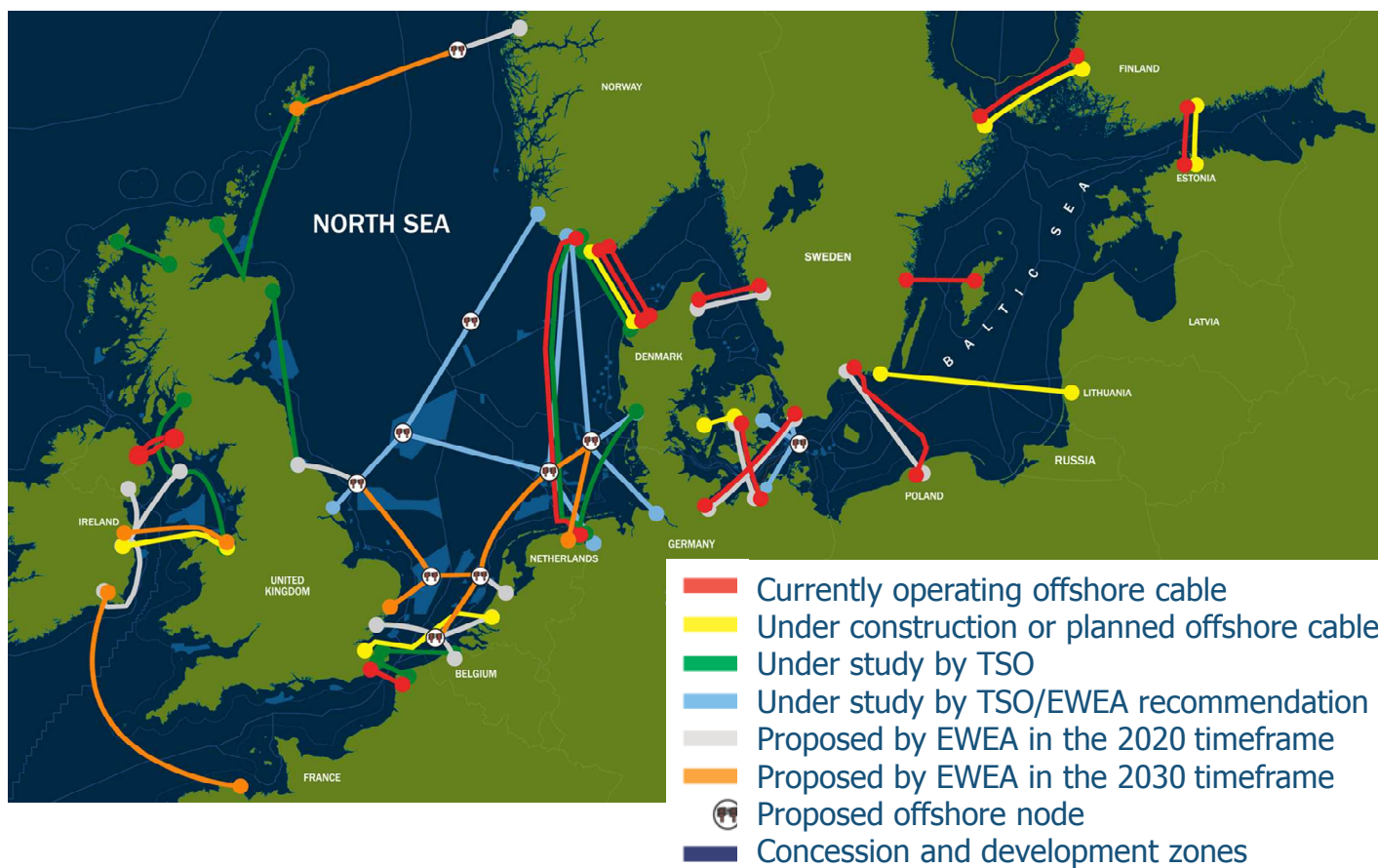
Avantages du courant continu

- Connexion de réseaux non synchrones
- Réglage du flux de puissance
- Transport de fortes puissances sur de longues distances



Source: Sustainable energy systems with HVDC transmission, G. Asplund, IEEE PES 2004

Plan de développement de l'éolien offshore dans la mer du Nord



Source: <http://www.greenunivers.com>

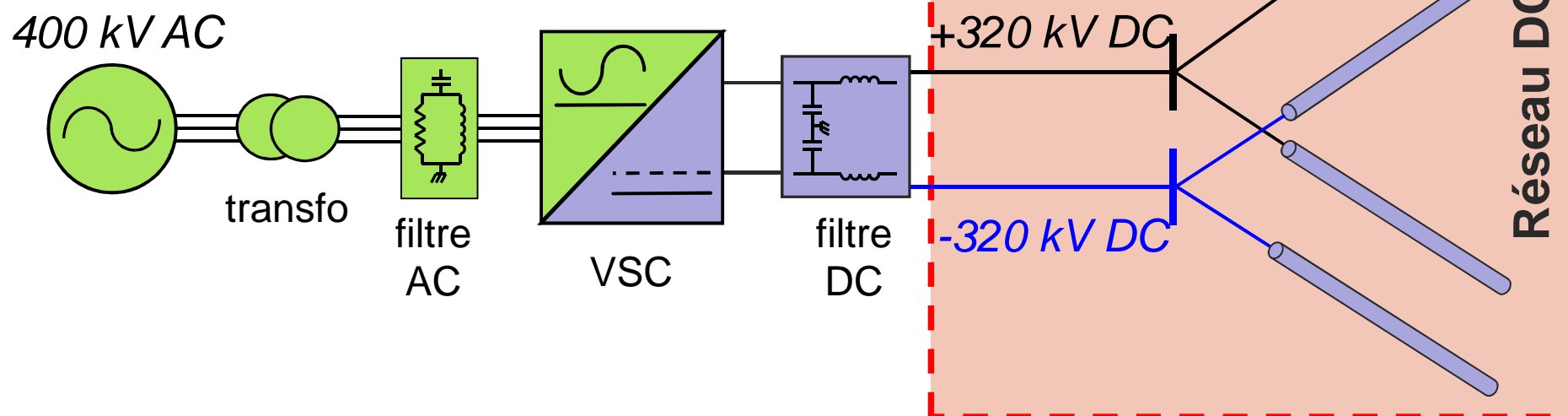
Plan

- Contexte des travaux
- Problématique
- Modélisation des réseaux DC
- Algorithmes envisageables
- Protection principale, secours
- Performances

- Perspectives

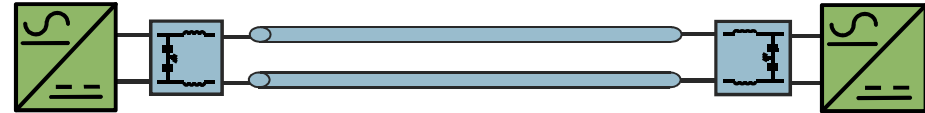
Objectifs des travaux

- Algorithmes de détection de défauts d'isolement rapide et sélectif dans le réseau DC
- Plan de protection complet applicable à toutes les architectures de réseau envisageables

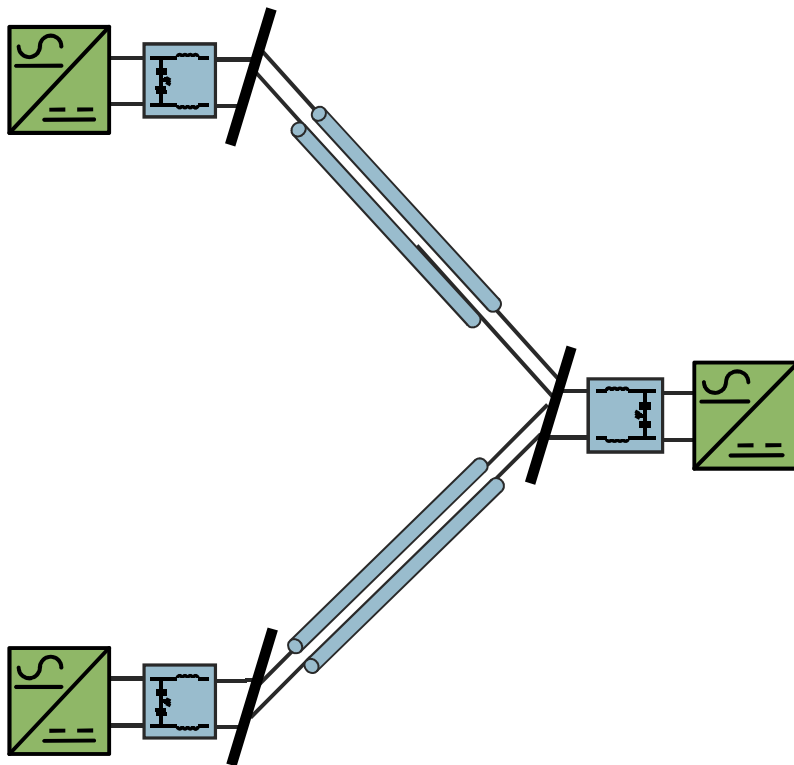


Protection des réseaux MTDC

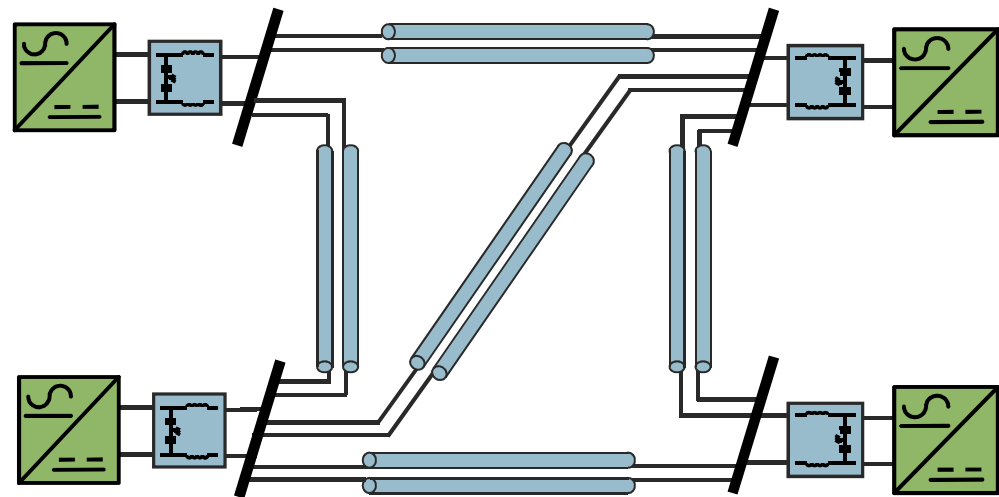
- Liaison HVDC point à point



- Réseau MTDC radial



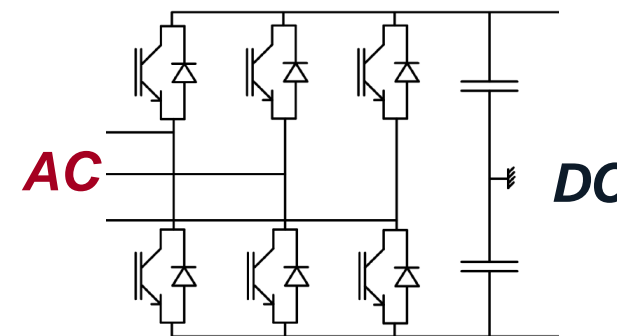
- Réseau MTDC bouclé/maillé



Contraintes diverses

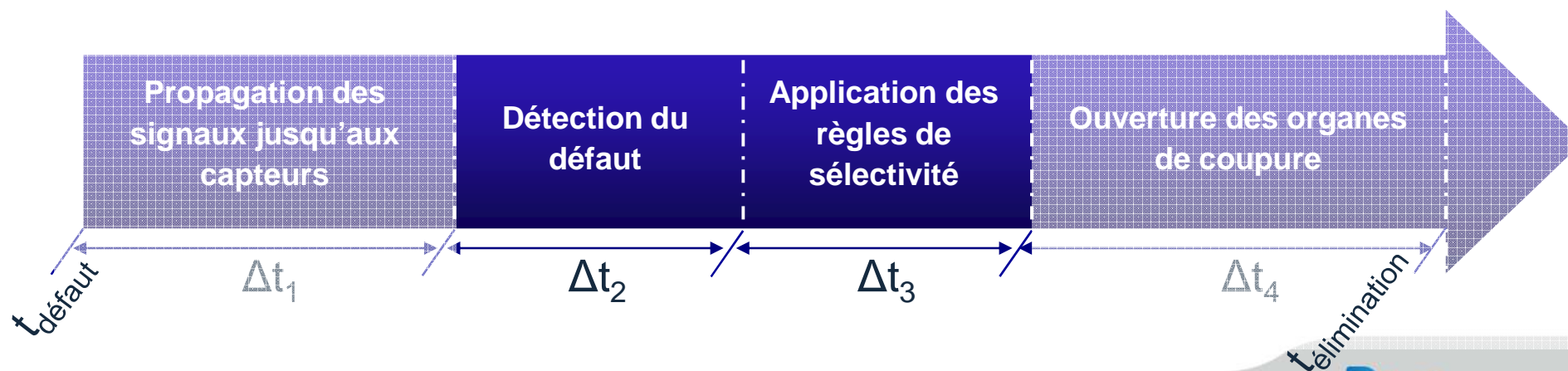
Protection du matériel

- Surintensités dramatiques générées par les défauts
- Matériel le plus contraignant : diodes
- $I_{\max} = 2 \text{ pu}$ (4 kA)



Interaction AC/DC

- Ne pas déclencher lors d'un défaut côté AC
- Temps de réponse inférieur à celui des protections AC



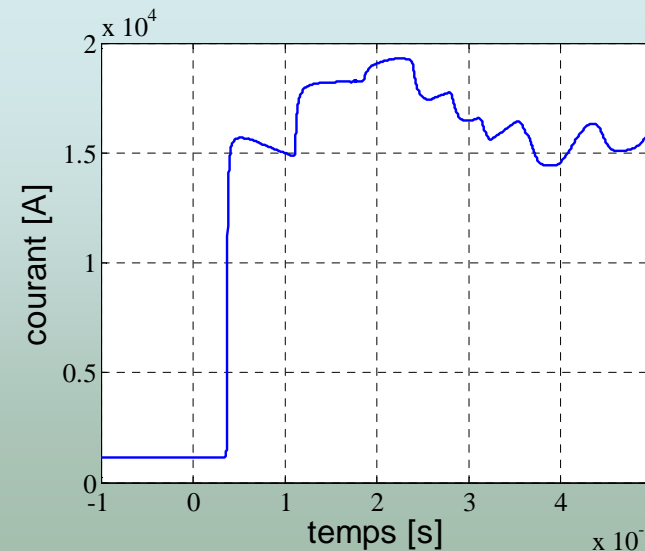
Contraintes sur l'algorithme

Protections DC

- Impédance (notion de réactance difficile à définir)
- Dynamiques différentes
- Algorithmes de protection AC non transposables directement au cas DC

Contrainte temporelle

- $di/dt \sim 10^8 \text{ A/s}$
- Régime permanent atteint très tard
- VSC peu robuste aux surintensités (diodes notamment)
- **L'élimination du défaut doit être effectuée pendant la phase transitoire des signaux**

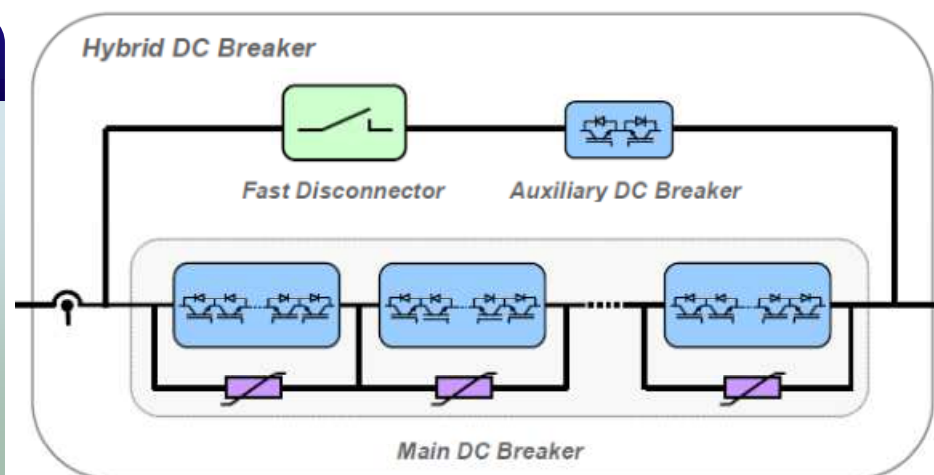


Contraintes sur la coupure DC

Coupure DC

- Disjoncteurs mécaniques
 - Beaucoup trop lents ($\sim 20 \text{ ms}^*$)
- Coupure hybrides ($\sim 2 \text{ ms}^*$)
- Coupure purement statique ($\sim 200 \mu\text{s}^*$)

** temps indicatifs*



Source: ABB

Technologie hybride

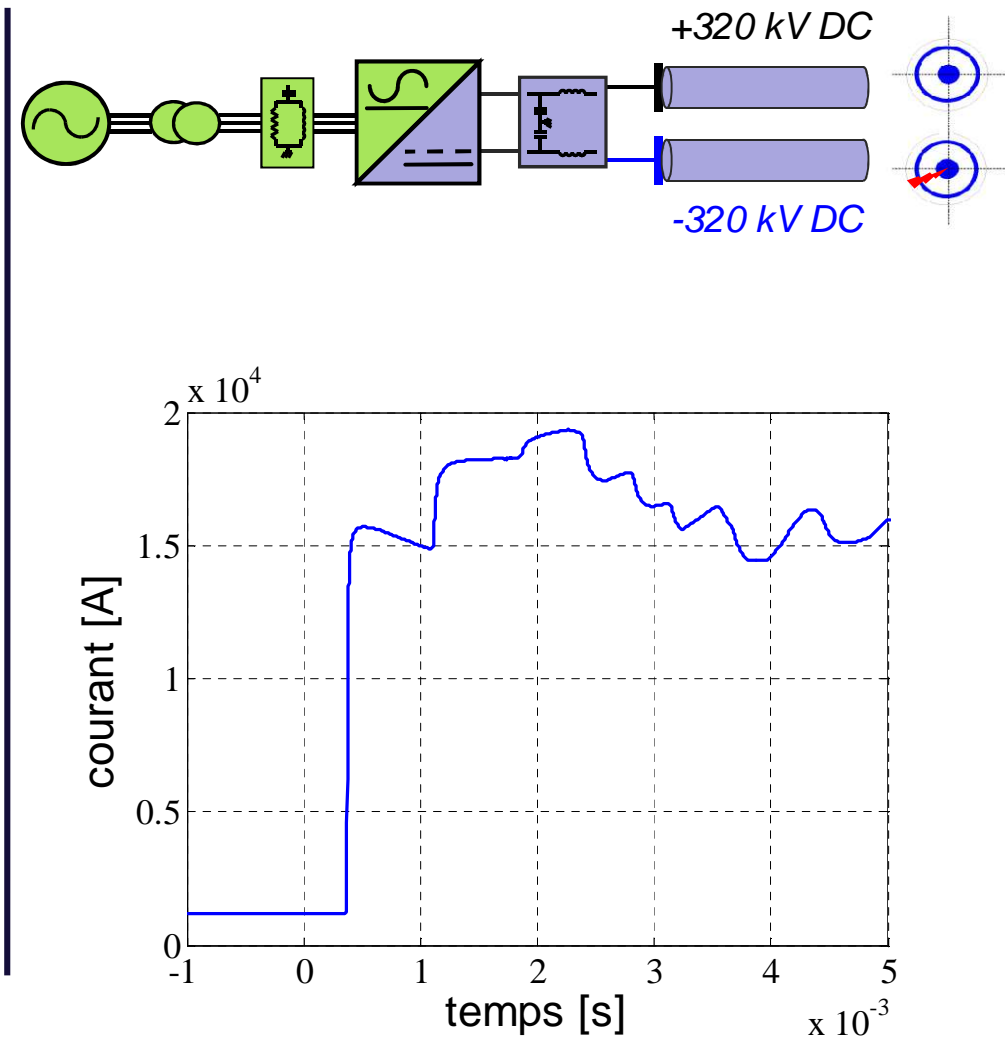
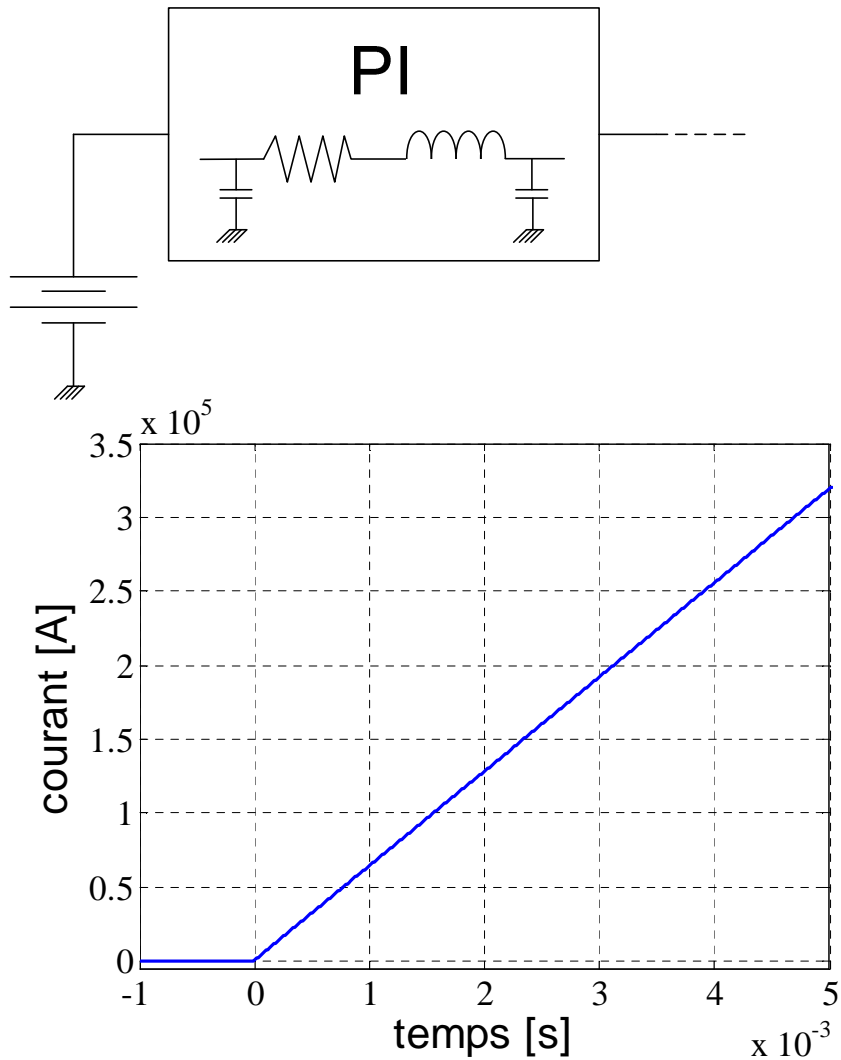
- Ouverture en moins de 5 ms
- Pouvoir de coupure d'environ 10 kA

} performances attendues dans le cadre de Twenties

Plan

- Contexte des travaux
- Problématique
- **Modélisation des réseaux DC**
 - Modèle et résultats
- Algorithmes envisageables
- Protection principale, secours
- Performances
- Perspectives

Modélisation du réseau DC



Simulations du réseau DC

Modèle détaillé

- Toutes les fréquences (DC -> fréquences générées par le défaut)
- Phénomènes de propagation

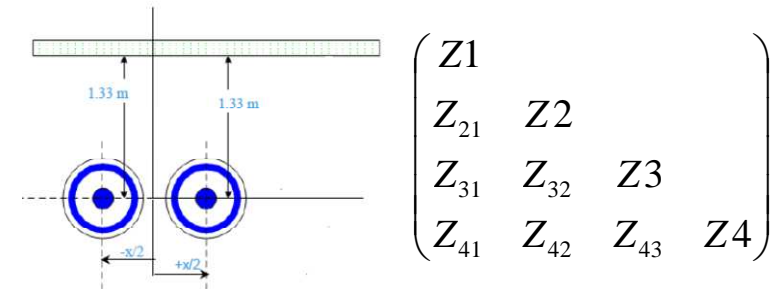


EMTP_{RV}

The reference for power systems transients

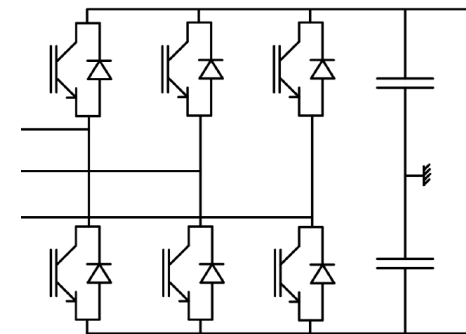
Câble DC

- WideBand
- Dépendant de la fréquence



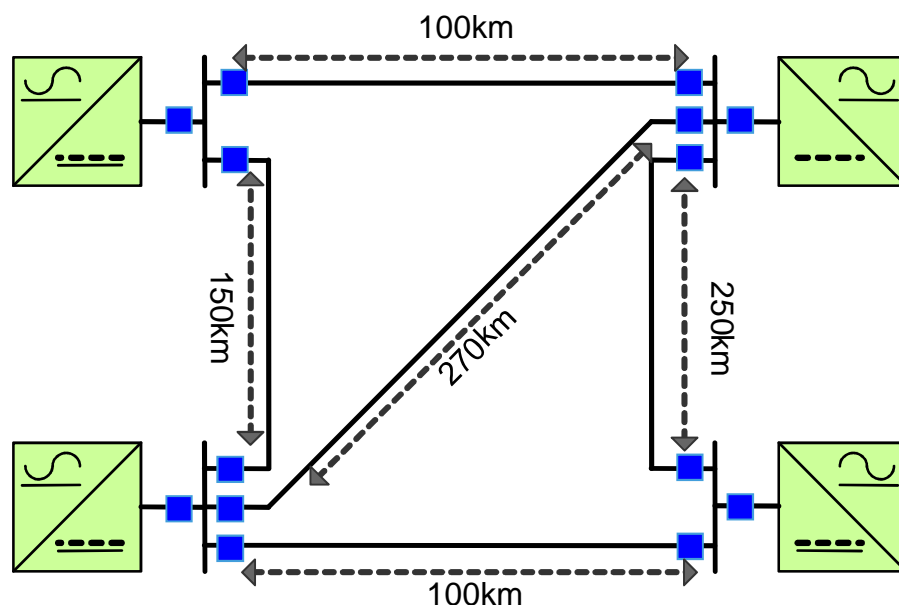
Convertisseurs

- Modèle VSC détaillé à deux niveaux
- Multi-niveaux par la suite
- Commande L2EP



Caractéristiques des protections

■ Protection



Protection

- Capteur de courant
- Interface de calcul
- Organe de coupure DC

Emplacement

- A chaque extrémité de câble
- Sur chaque pôle
- Avant chaque jeu de barre

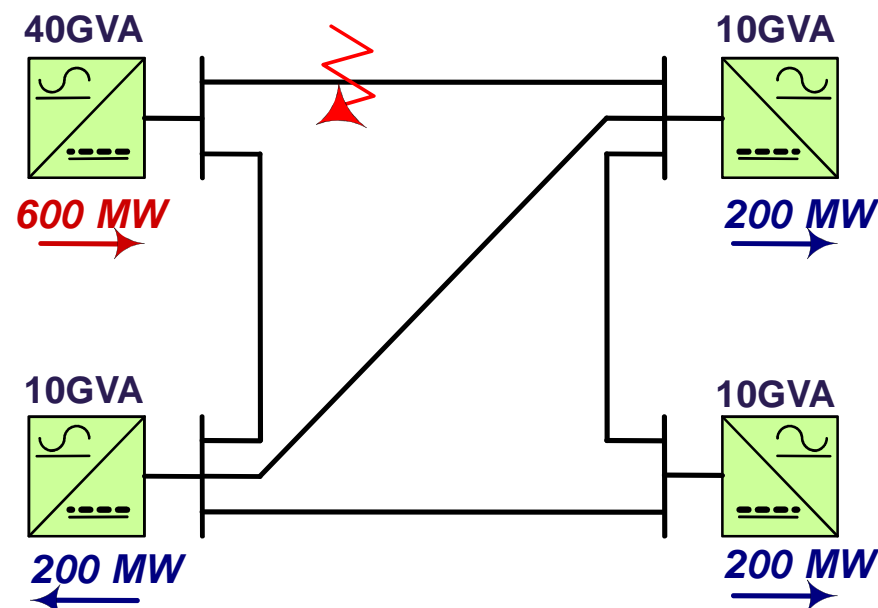
Caractéristiques du défaut

Représentation

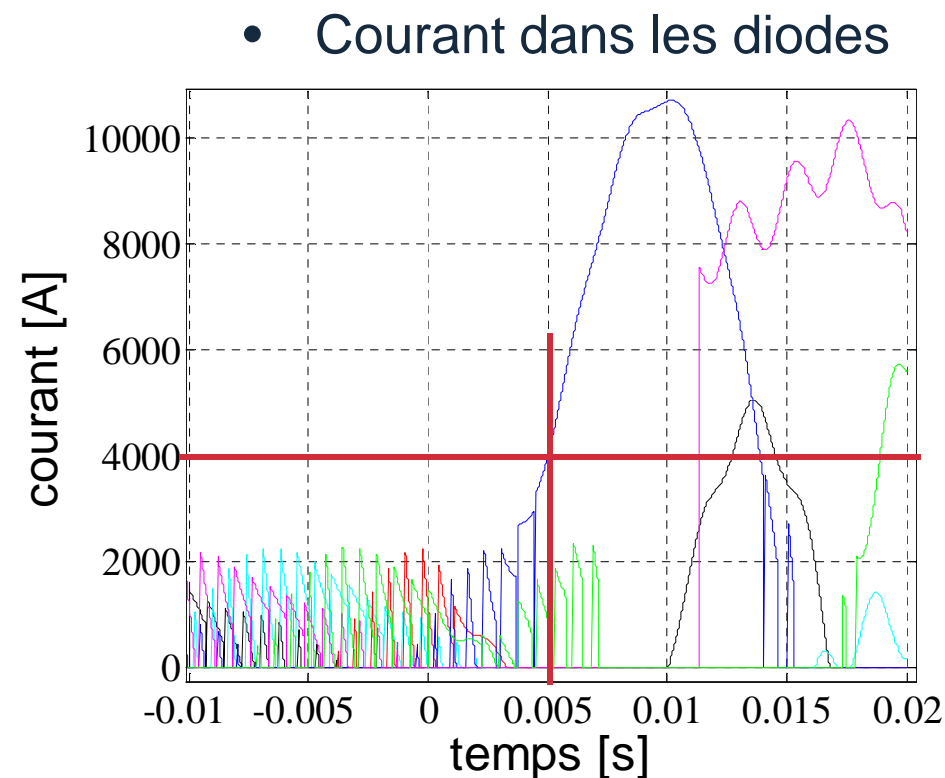
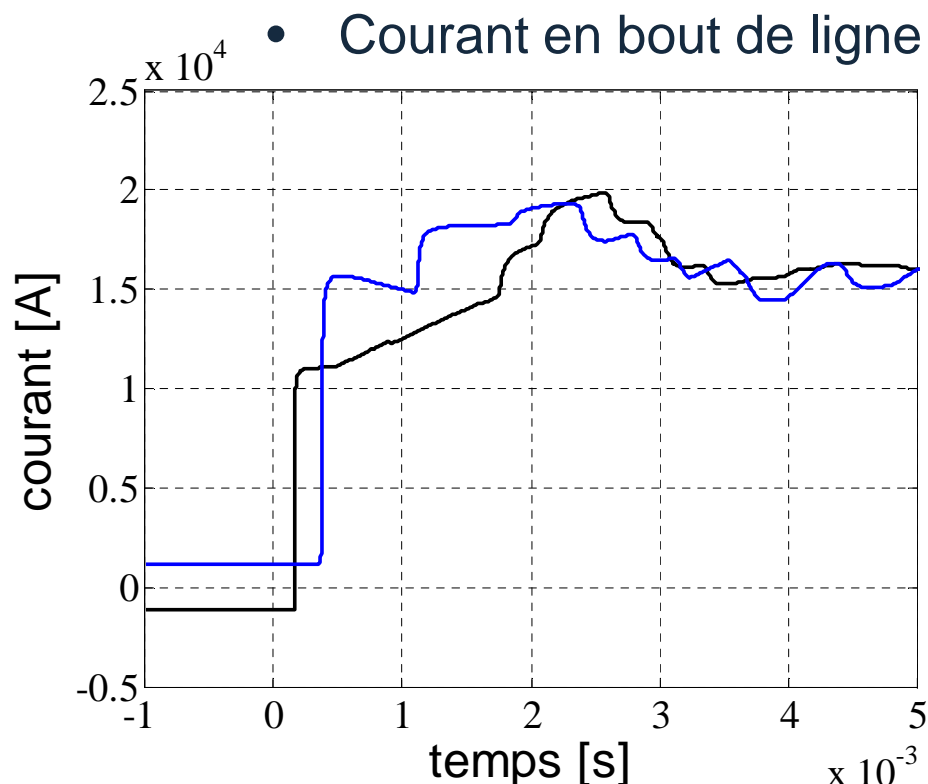
- Résistance constante
- Entre l'âme et l'écran d'un des pôle

Configuration

- $R_{\text{def}} = 1 \Omega$
- 30 km de la station de gauche



Résultats issus du modèle



$I > 2$ pu 5ms après le défaut

- Rapidité nécessaire
- Objectif : détecter le défaut de manière sélective dès l'arrivée du premier front d'onde

Plan

- Contexte des travaux
- Problématique
- Modélisation des réseaux DC
- Algorithmes envisageables
 - Principes envisageables
 - Protection principale
 - Secours
- Performances
- Perspectives

Méthodes envisageables

Analyse locale

- Courant et dérivée, tension
- Ne peut utiliser que l'atténuation des signaux
- Demande des seuils très fins et des capteurs de mesures très performants

Analyse locale fine

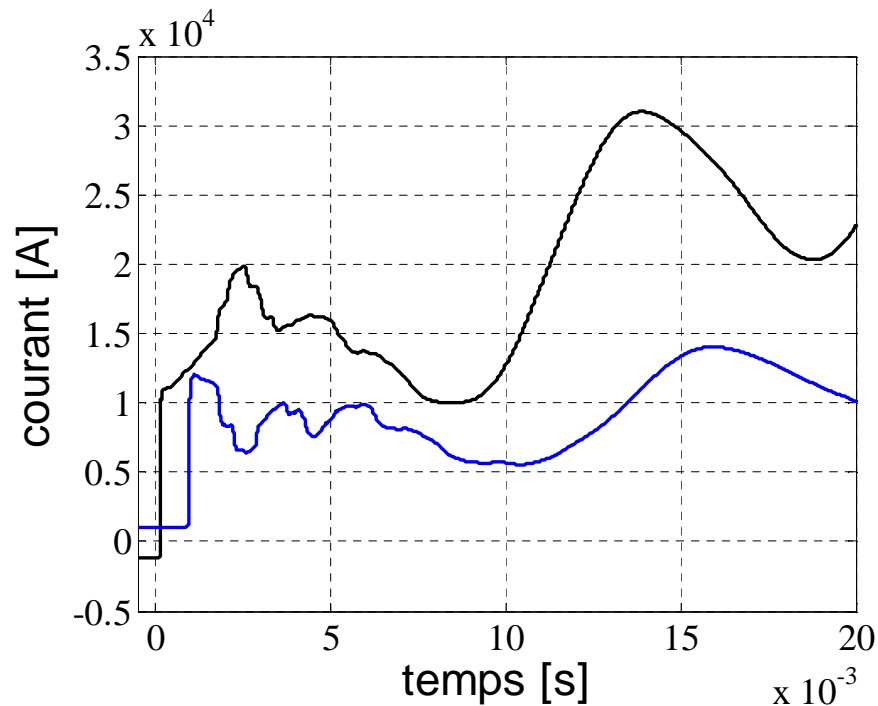
- Méthodes liées à la propagation (ondelettes, ...)

Analyse comparative

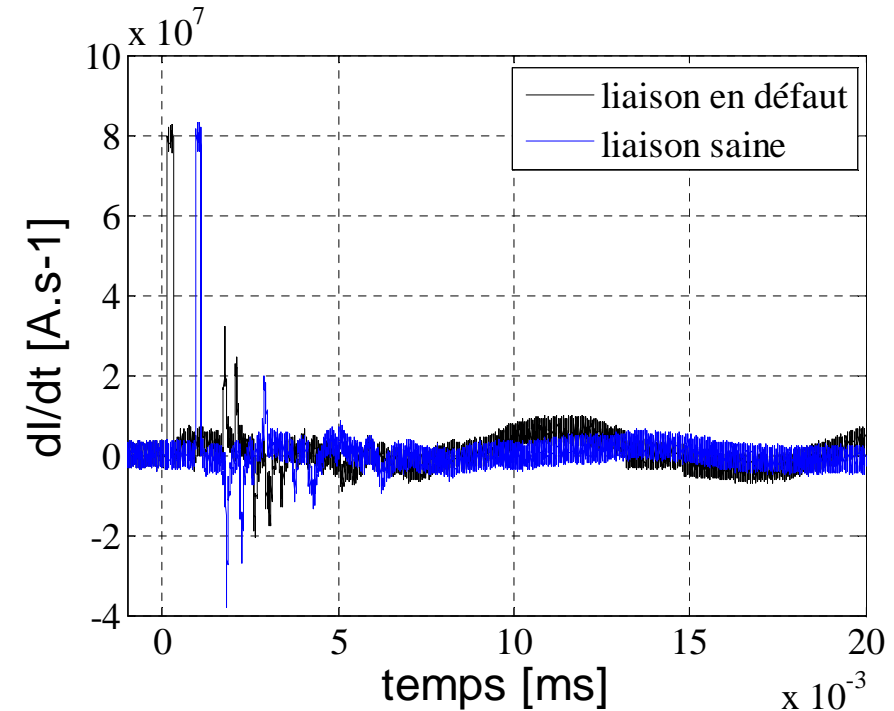
- Communication
- Mesures faites en plusieurs points (différentielles, ...)

Résultats issus du modèle

- Courant



- Dérivée du courant

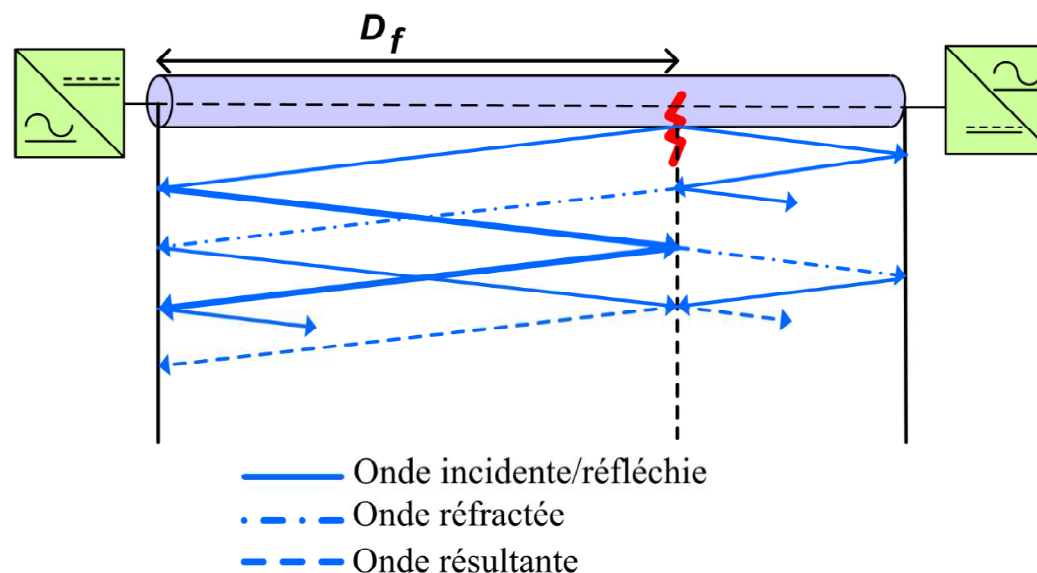


- La différence d'amplitude des signaux pour une liaison saine / en défaut est trop faible pour être sélective

Méthodes liées à la propagation

Réflexions multiples

- Connues sur un modèle
- Réseau réel : présence de nombreuses discontinuités (chambres de jonction, impuretés, etc...)



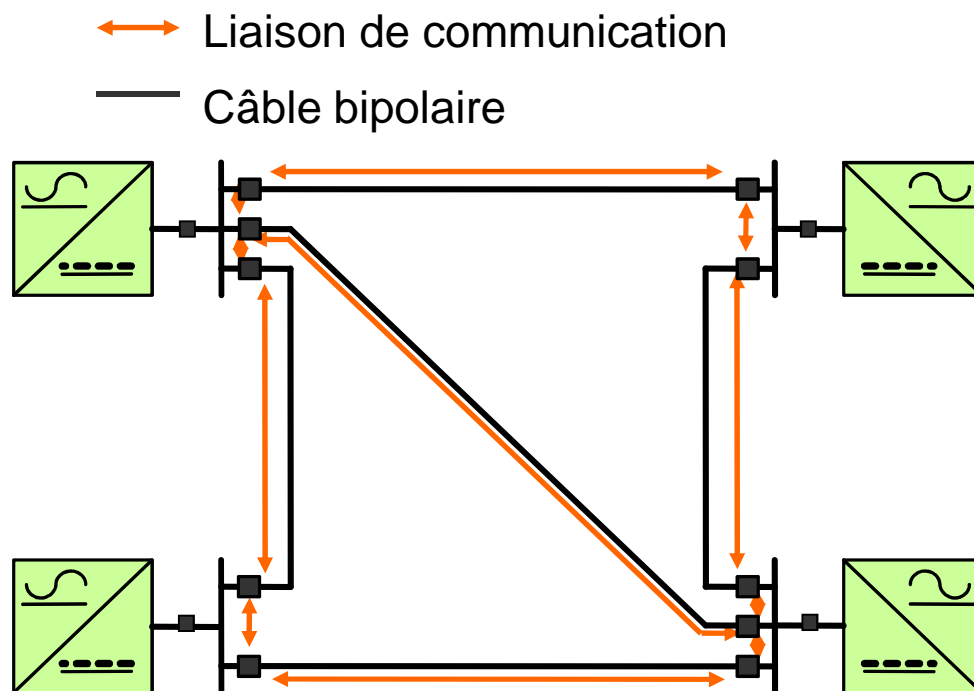
Mise en oeuvre

- Signaux plus complexes => temps de calcul plus élevé et risque d'erreurs plus grand
- Pour l'instant, aucune méthode connue n'assurant la sélectivité sans communication

Analyse comparative

Utilisation d'une fibre optique

- La sélectivité peut être assurée
- Le risque de dysfonctionnement est faible, même en cas de défaut



Hypothèses

- Vitesse de propagation dans la fibre optique : 200 km/ms
- Synchronisation des données horodatées

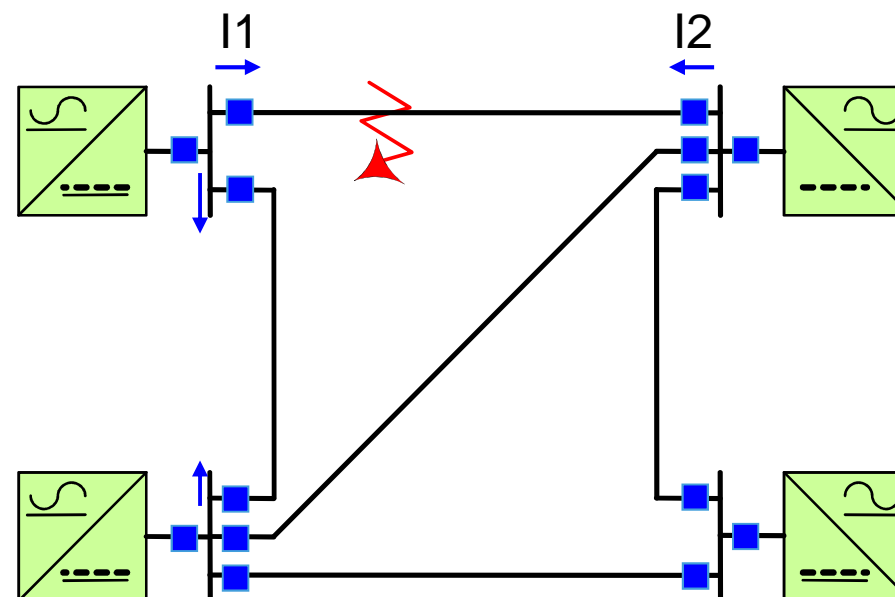
Méthodes envisageables

Détection

- N'importe quel signal peut être utilisé
- Tension, courant, dérivées, ...

Sélectivité

- Courant différentiel
- Critère directionnel



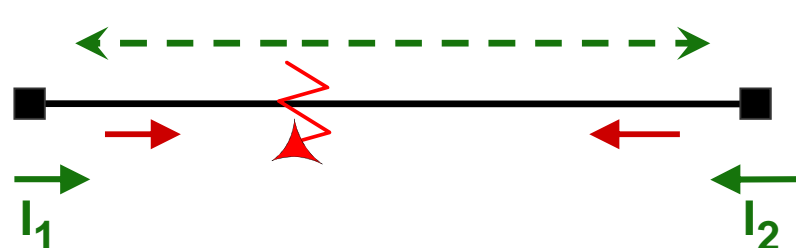
Courant différentiel

$$I_{\text{diff}} = I_1 + I_2$$

→ Orientation capteur

→ Sens du courant

• Liaison en défaut



$I_{\text{diff}} = 0$

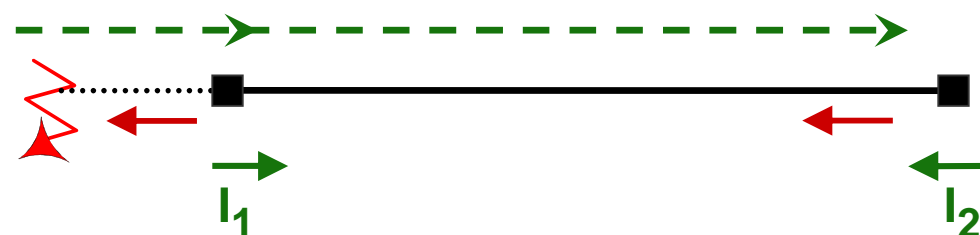
Propagation

$I_{\text{diff}} > 0$

Transitoire

$I_{\text{diff}} > 0$

• Liaison saine



Avant le défaut $I_{\text{diff}} = 0$

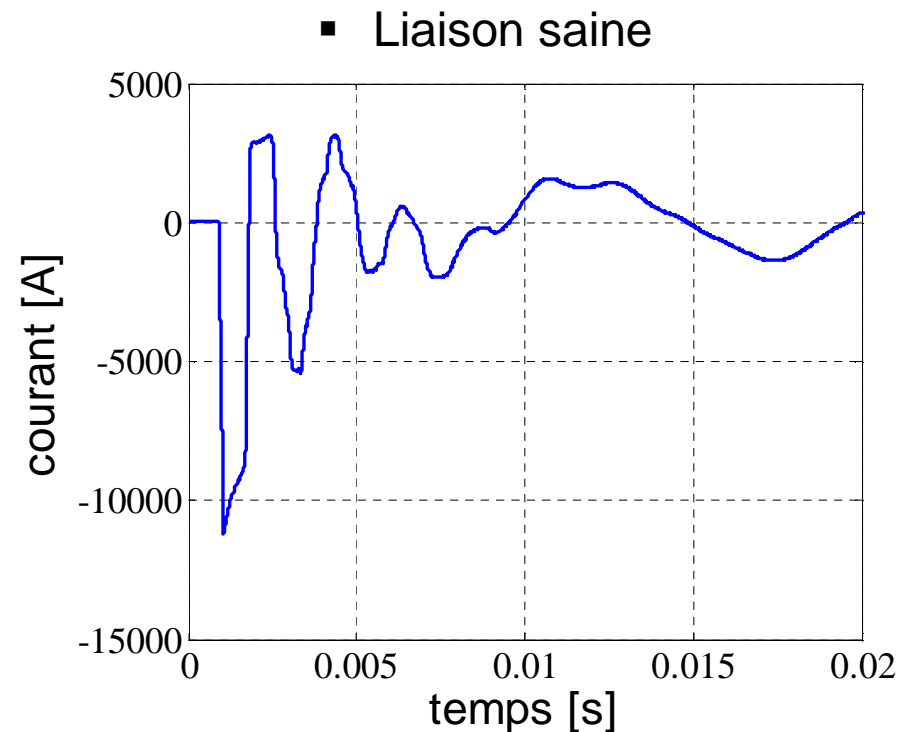
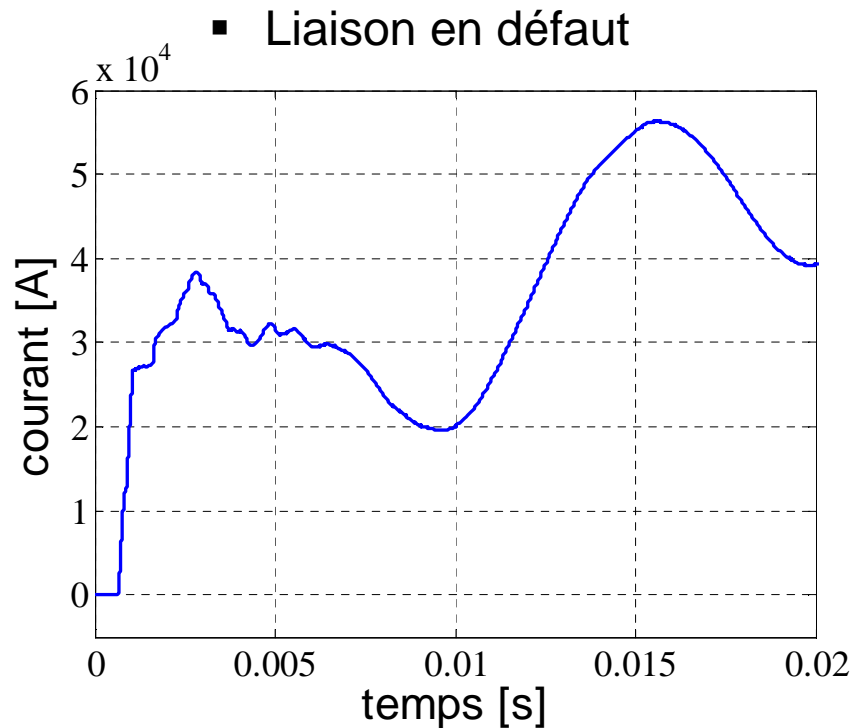
Premier front $I_{\text{diff}} < 0$

Régime permanent $I_{\text{diff}} = 0$

Temps

Algorithme de protection principal envisagé

- Courant différentiel adapté à la dynamique des réseaux DC



- Rapidité => utiliser le moins d'échantillons possibles
- Ajout d'un blocage si dépassement d'un seuil négatif

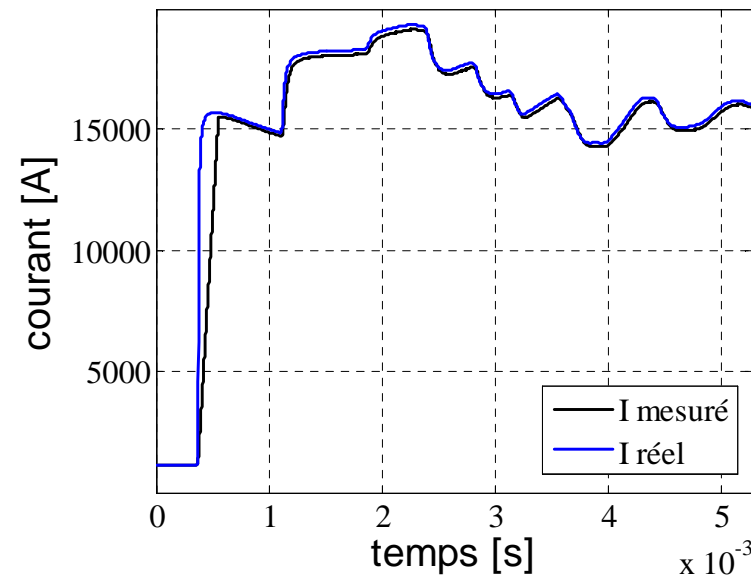
Algorithme de protection principal envisagé

- Existence d'un courant différentiel non nul
=> perturbation dans le réseau (DC ou AC)
- N'importe quel seuil >0 et tenant compte des incertitudes permet la détection
 - Compromis entre rapidité et gamme de défauts détectés
 - Seuil choisi : $I_{th} = 2 \text{ kA}$
- Calcul du courant différentiel
 - Si $I_{diff} > +I_{th}$ pour 3 échantillons consécutifs – envoi de l'ordre d'ouverture
 - Si $I_{diff} < -I_{th}$ pour 3 échantillons consécutifs – blocage pendant Δt
 - Sinon – attente

Modélisation de la protection

Capteur de courant

- Bande passante (DC – 10 kHz)
- Limitation du temps de montée (80 kA/ms)
- Saturation (30 kA)
- Précision (98%)
- Bruit blanc (+ ou – 2 A)



Fibre optique

- Retard dû à l'échange d'informations entre protections (propagation)
- Traitement des informations (encodage/décodage)

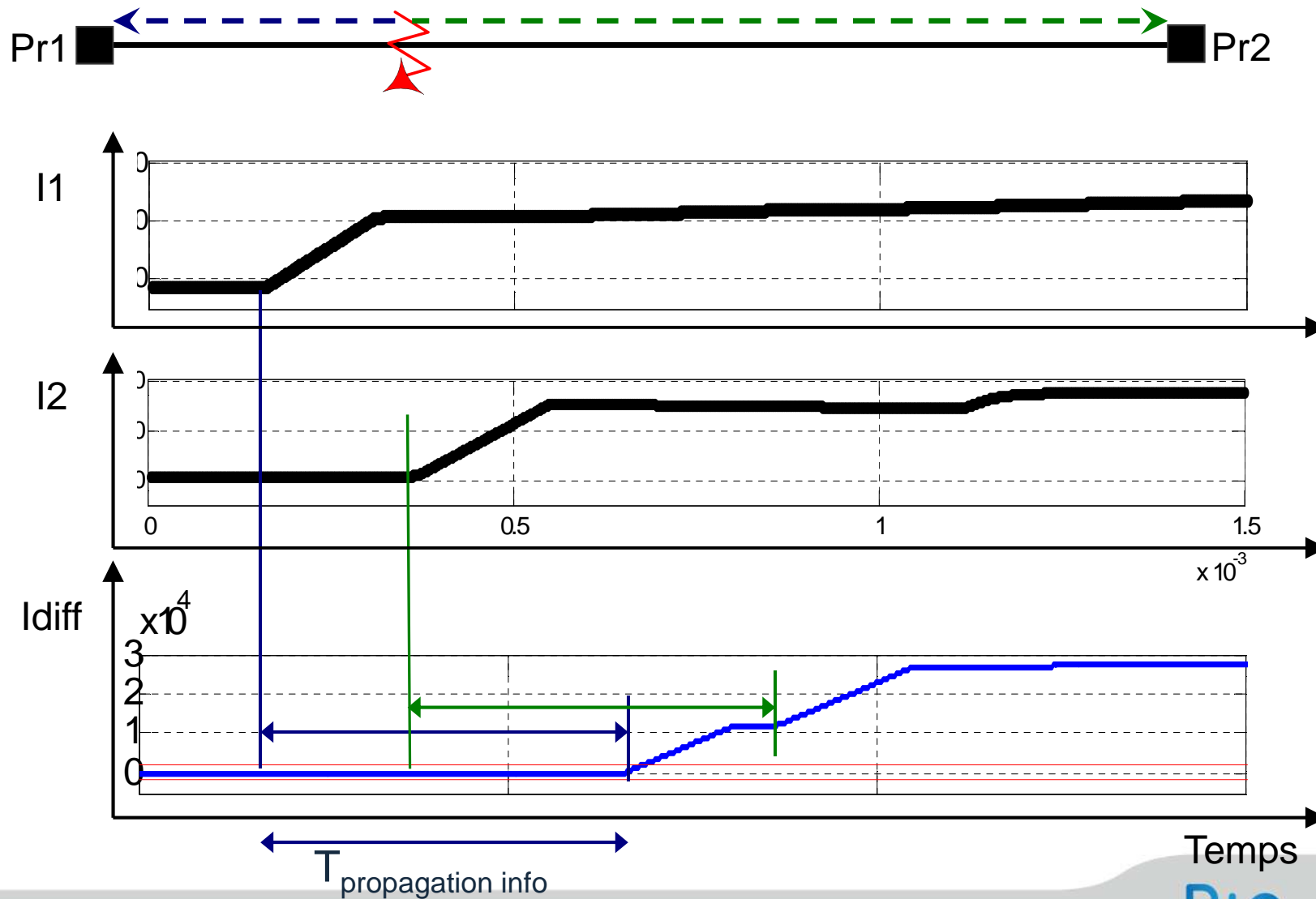
Temps de calcul (différentielle)

- 1 pas de temps vu la simplicité du calcul

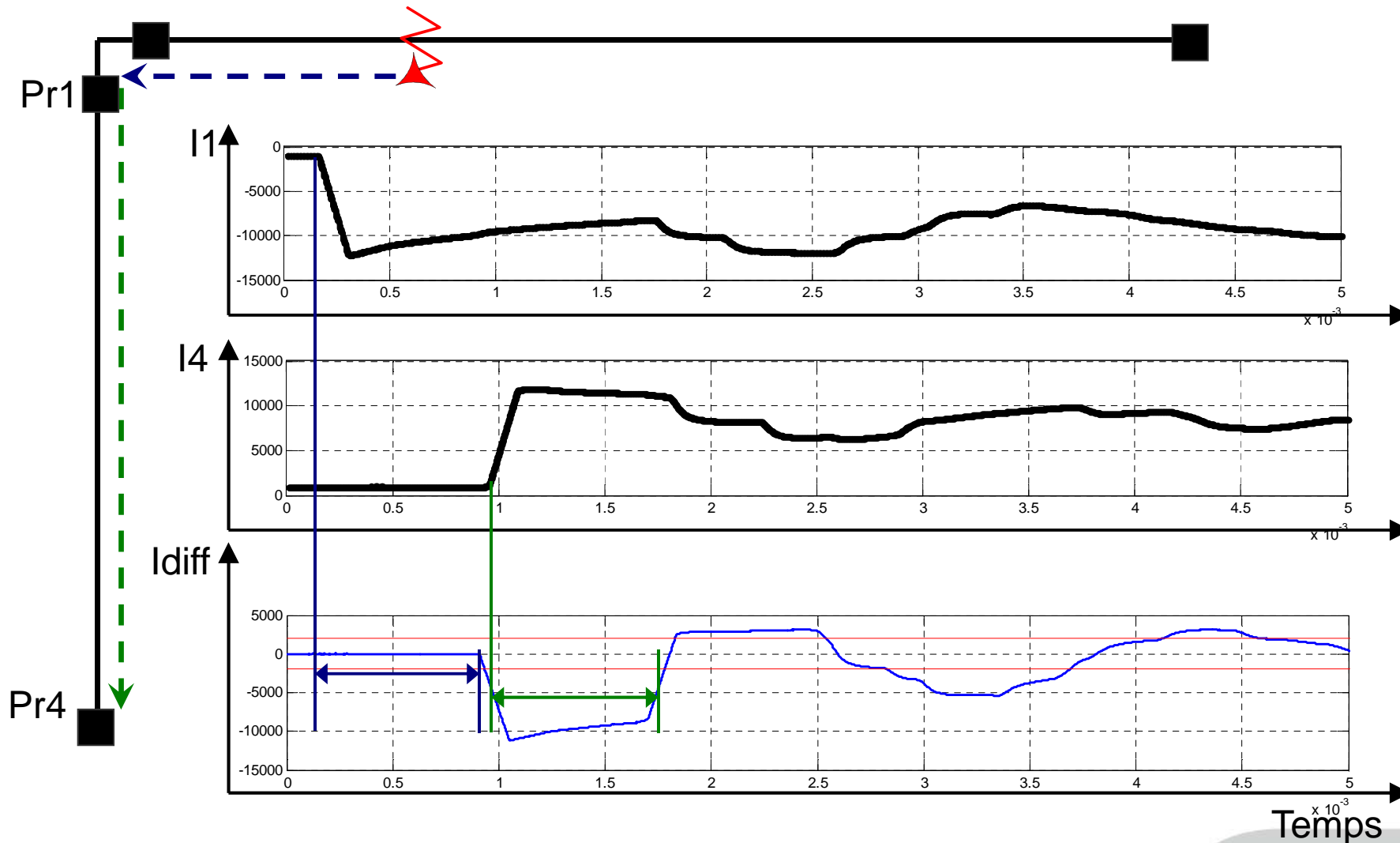
Organe de coupure

- Ouverture en 300 μ s

Algorithme de protection principal envisagé



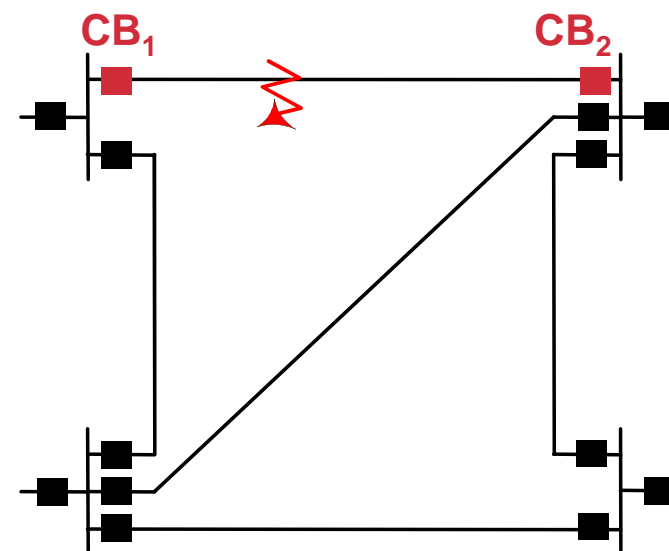
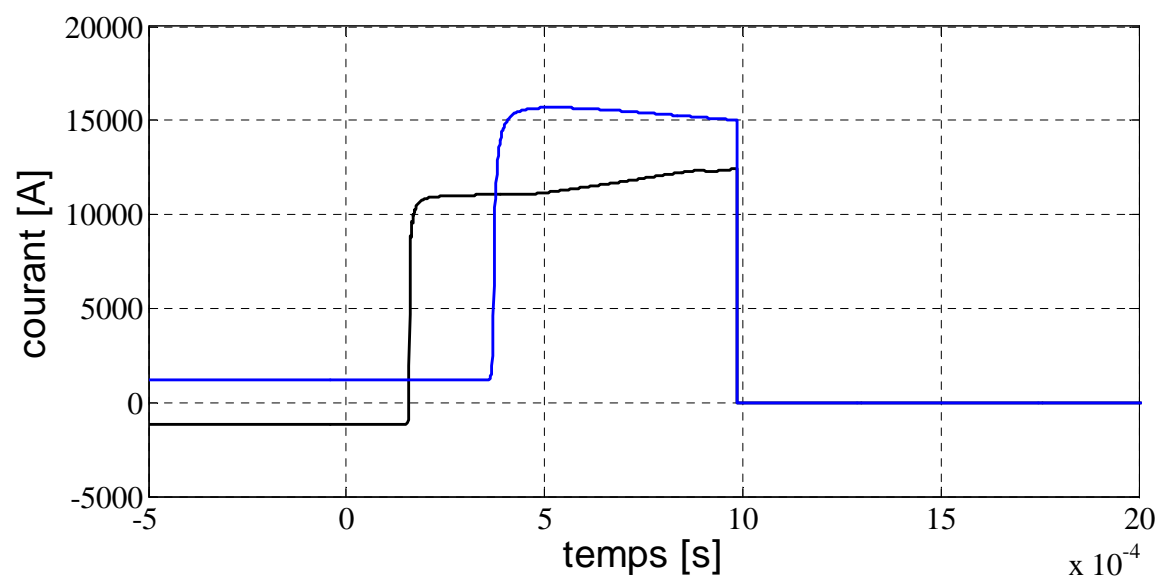
Algorithme de protection principal envisagé



Performances théoriques

- Ouverture CB₁ et CB₂ à $t = 0.986$ ms

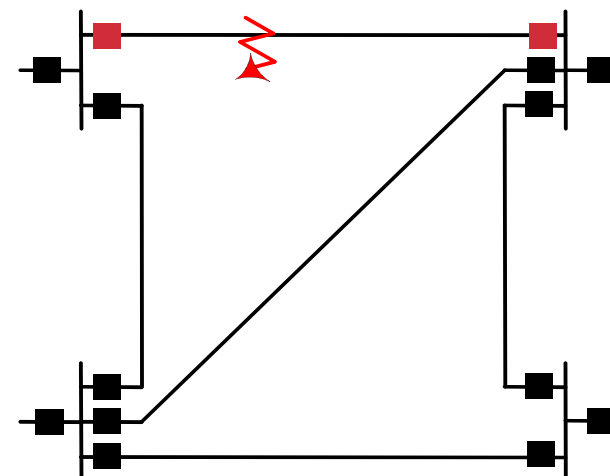
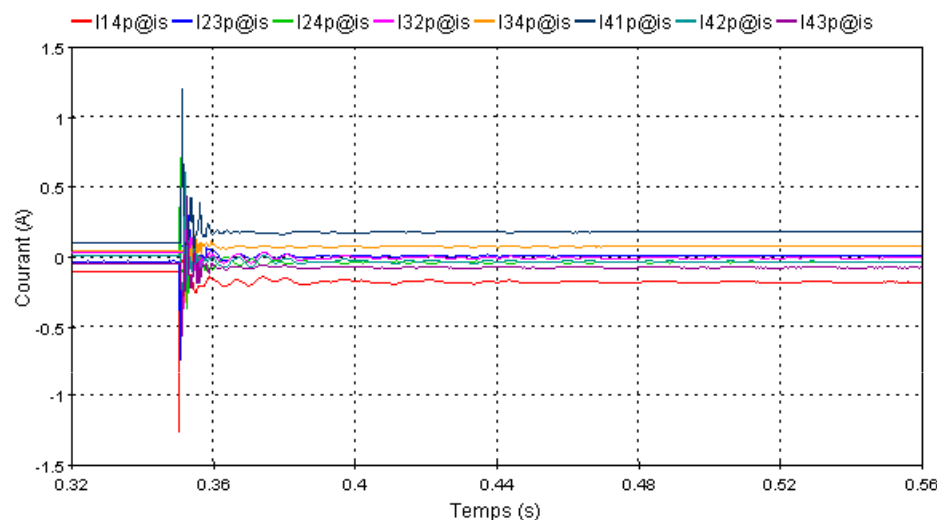
- Courant liaison en défaut



- Aucune diode des VSC n'est affectée

Protection différentielle

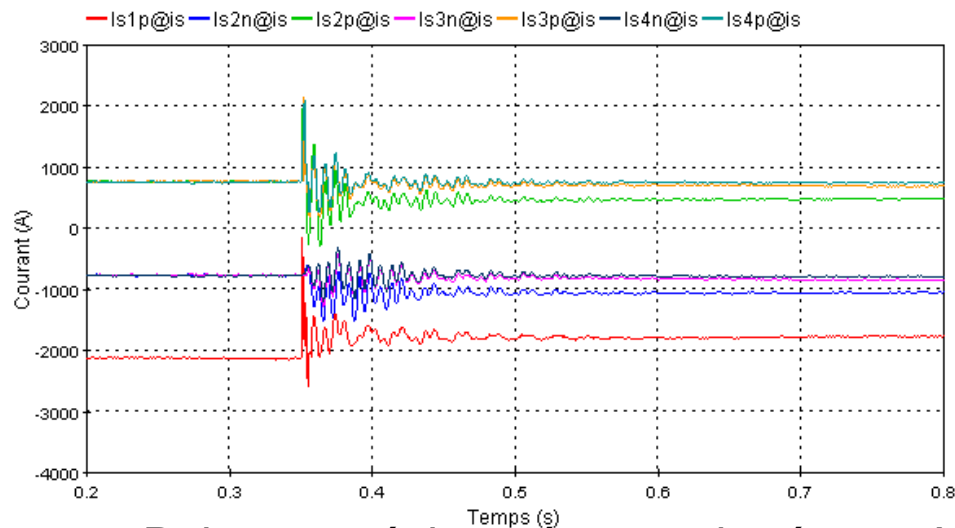
■ Liaisons saines



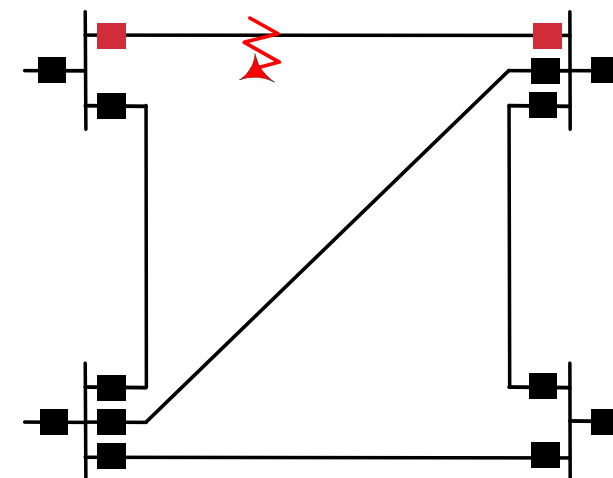
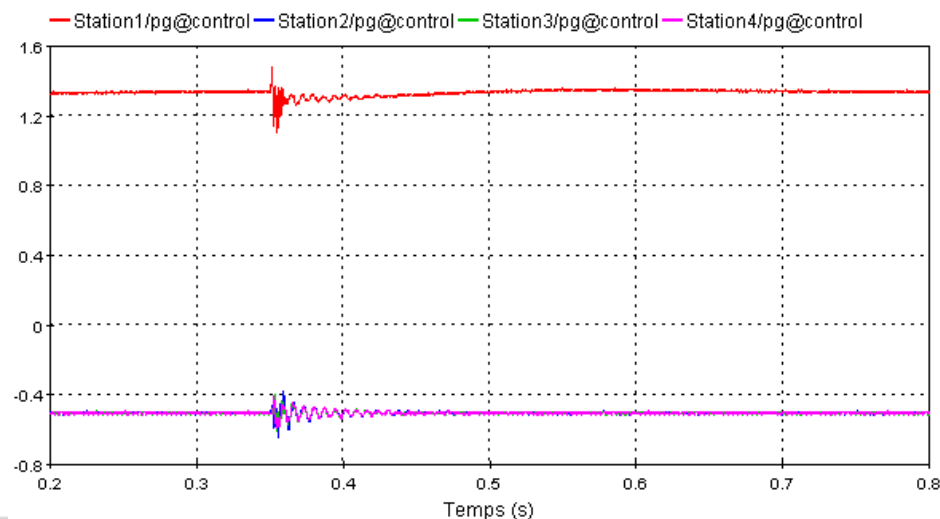
- Aucune autre protection en déclenche, le système redevient stable
- Le report de charge sera géré par les boucles de régulation (temps de réponse long), mais non pris en compte ici

Protection différentielle

■ Courants sources

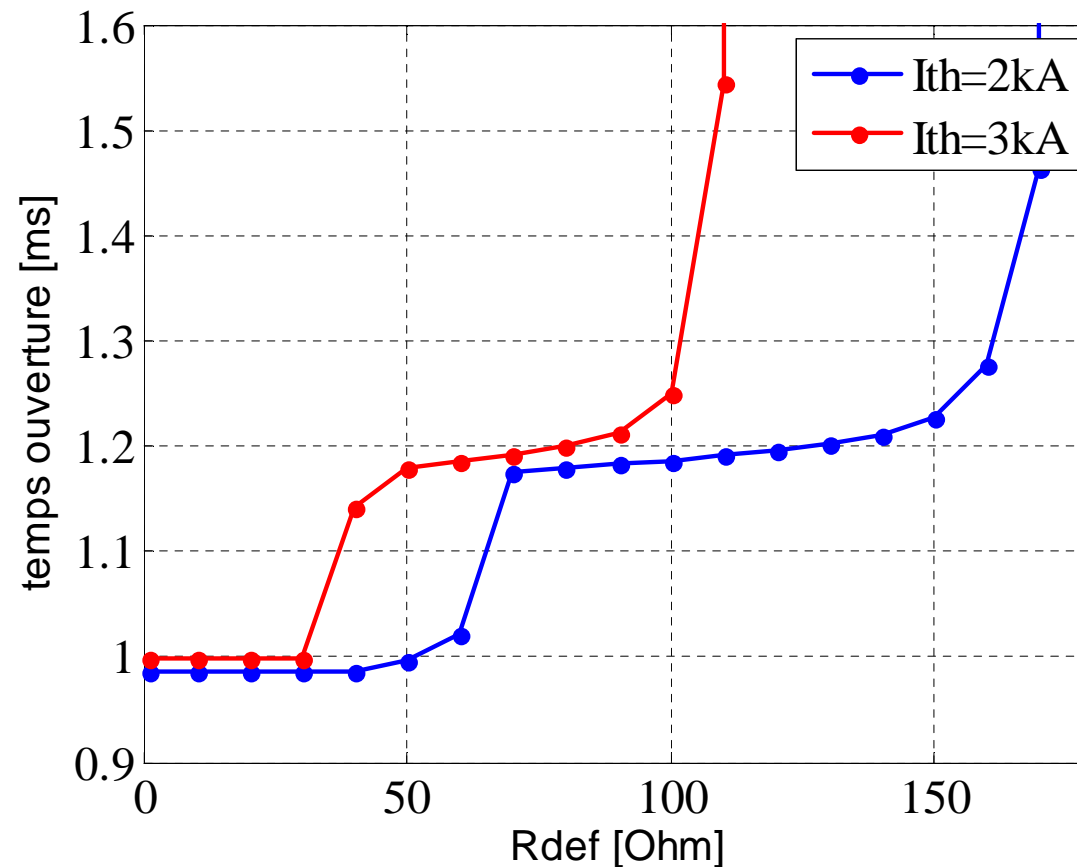


■ Puissance échangée avec le réseau AC



- Le transfert de puissance revient à la valeur de référence

Influence de la résistance de défaut



- R_{max} dépend de l'architecture du réseau et du seuil choisi

Manœuvres sur le réseau

Variation du transit de puissance

- Temps de réponse des boucles de contrôle de l'ordre de 100 ms

Déconnexion d'une liaison

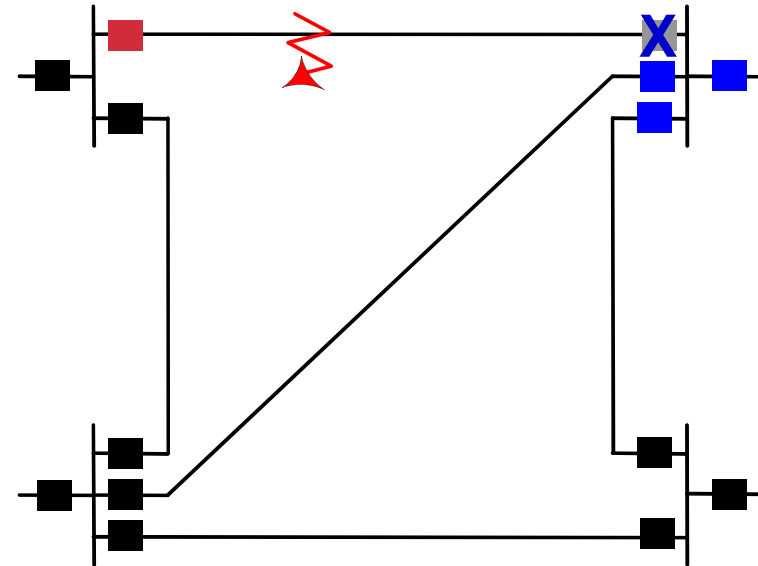
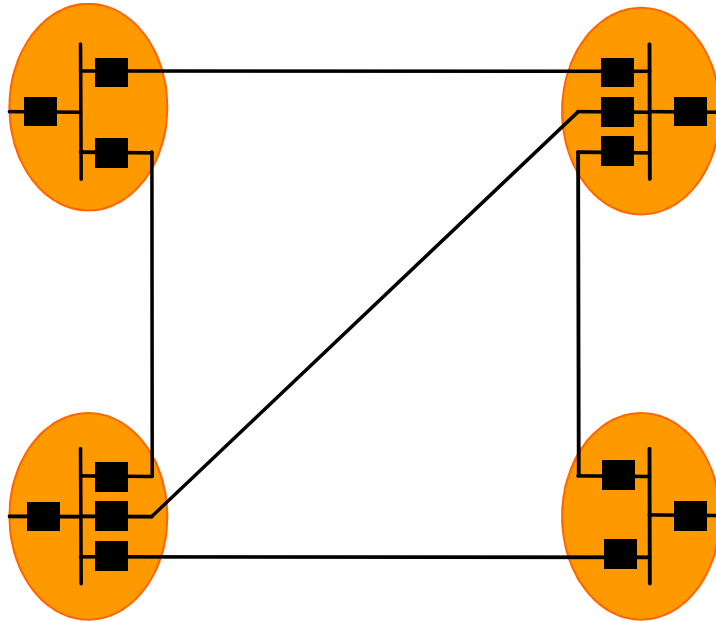
- Suite à un défaut ou non
- Apparition d'un transitoire mais de faible amplitude

Enclenchement de ligne

- Fort appel de courant pour charger les capacités des câbles
- Non admissible pour le réseau
- Enclenchement progressif

Mise en place d'un secours

- La protection principale n'a pas déclenché (problème algorithme ou CB)

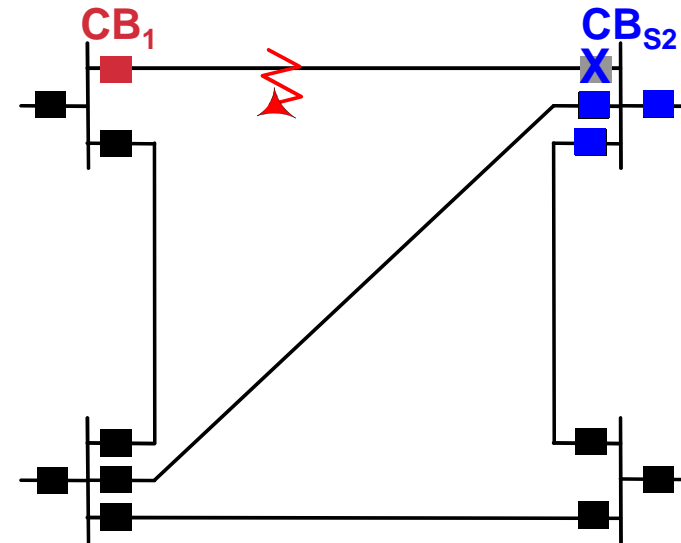
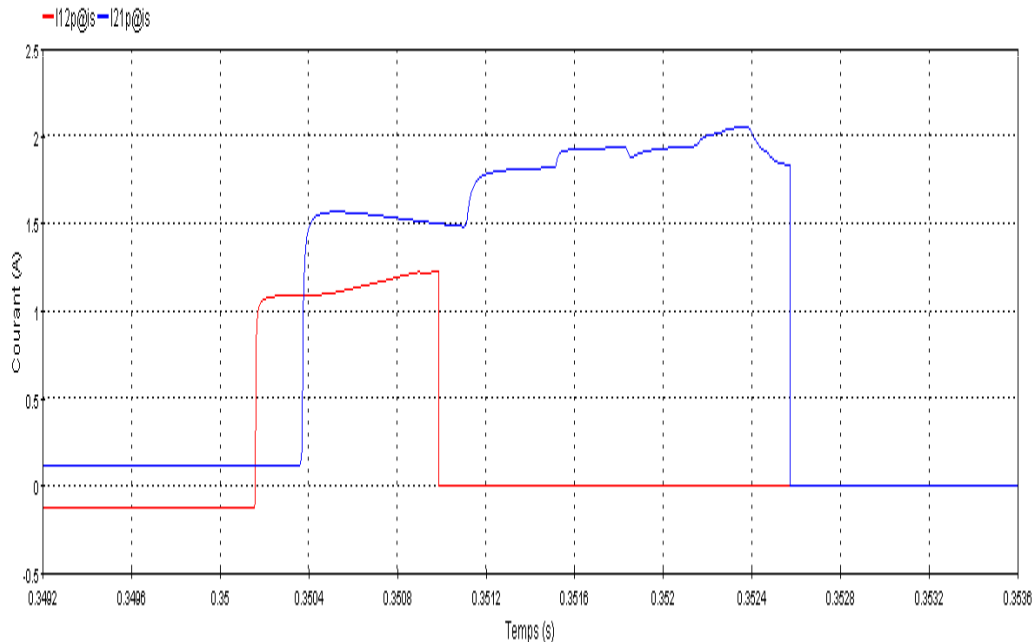


- Surintensité au niveau de la station
- Engendre l'ouverture de tous les CB du jeu de barre
- Seuil : 2 pu (au plus proche de la contrainte)

Action du secours

- CB1 ouvre à $t = 0.986$ ms
- CB2 n'ouvre pas
- Les CB s2 ouvrent à $t = 2.571$ ms

■ Liaison en défaut

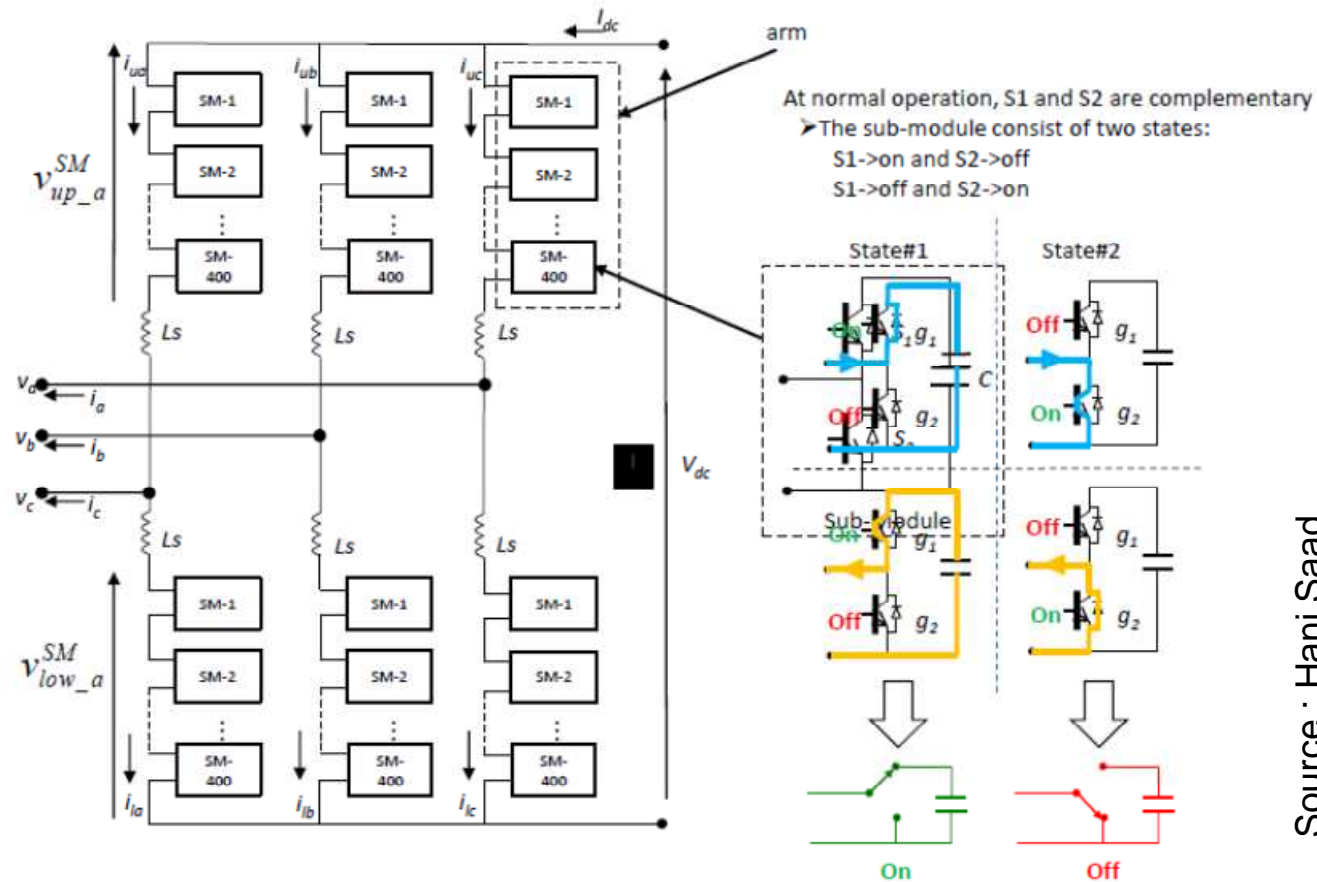


- Aucune diode des VSC n'est affectée

Conclusion sur le plan de protection

- Protection MTDC maillés avec VSC
- Première stratégie de plan de protection
- Protection différentielle
 - Ne dépend pas du point de fonctionnement, contrairement au secours
- Performances attendues pour le moyen de coupure
 - Contrainte temporelle diodes (pire cas) : 3 ms
- Vérifier la robustesse de l'algorithme
 - Erreurs de mesures
 - Résistance de défaut
- Assurer le secours pour tous les cas de résistance de défaut
- Convertisseurs multi-niveaux => dynamiques différentes

MMC – technologie SIEMENS

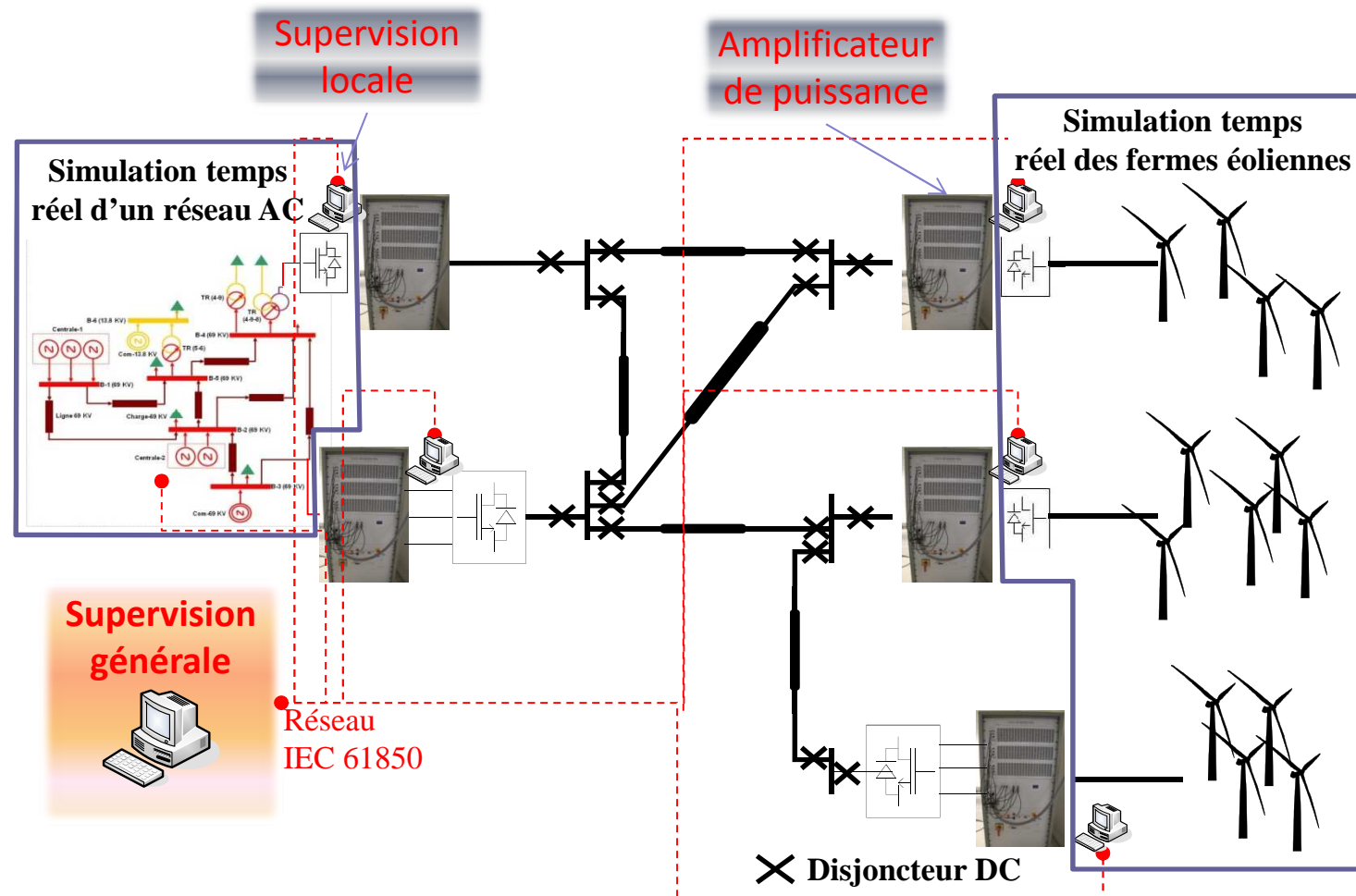


Source : Hani Saad

- Les grandeurs sont plus lisses, le besoin de filtrage est bien inférieur
- => di/dt plus grand que dans le cas où il y a une inductance de lissage

Maquette de réseau DC – L2EP

- Démonstrateur TWENTIES (qui sera implanté au L2EP)





Réseau de transport d'électricité



Protection des réseaux à courant continu de forte puissance

Justine Descloux

IEEE PES – Chapitre Français
Soirée Doctorants

10-02-2012