

## Systèmes de conduite des grands réseaux électriques

- Fonctions et structures des systèmes d'énergie électrique
- Fonctionnement physique des systèmes d'énergie électrique
- Centres de conduite
- Problèmes ouverts (1 séance de type séminaire)

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

## B. Fonctionnement physique des réseaux d'énergie électrique

- NB. Rappels pour certains
- Mais vision plus fonctionnelle que mathématique
- Chapitres 4, 5 et 6 du Weedy
- Démo CCLAB

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

## Menu

- Description des problèmes
  - Equilibre puissance/fréquence
  - Réglage de la tension
  - Ecoulement de puissance et sécurité statique
  - Sécurité dynamique
- Brainstorming autour de la notion de sécurité
- Anticipation sur les outils

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

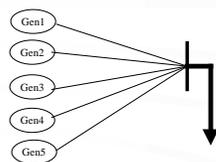
## Equilibre puissance fréquence

- Nécessité d'adapter la production à la demande de puissance active
- Réglage à plusieurs niveaux hiérarchiques
- NB: si équilibre n'est pas rétabli par le réglage --> la fréquence chute --> action de relais de protection
- NB : nous allons négliger les aspects réseaux dans cette introduction (= modèle à nœud unique)

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

## Remarque : modèle à nœud unique



**Néglige les aspects réseaux**

- les flux de puissance
- les pertes
- les questions relatives à la sécurité

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

## Très long terme (plusieurs années à l'avance)

- Décisions de construction de centrales pour répondre aux besoins sur une longue période
- Contrats d'achats de combustibles où d'énergie électrique

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

## Long terme (quelques mois à l'avance)

- Gestion des ressources existantes
- Plans de maintenance
- Stratégie(s) d'exploitation des réserves hydrauliques
- Achats de combustibles

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

## Gestion journalière (quelques jours/heures à l'avance)

- Transactions (achats et ventes d'énergie)
- Etablissement de plans de démarrage hebdomadaires et journaliers (pour le suivi de la courbe de charge)
- Services auxiliaires (réserves de réglage)
- Basé sur une prédiction de la consommation court-terme : les contrats et les règles du jeu définissent celui qui est responsable de faire la prédiction

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

## Temps réel (secondes à minutes)

- Ajustement du niveau de production à la demande réelle (mesurée en temps réel)
- Réglage fréquence / puissance
- Réaction en cas d'imprévu (perte de groupe, ou de ligne dans le réseau de transport)
- Nécessite des réserves de réglage (plusieurs types de réserves en pratique)

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

## Comment ça fonctionne

- Deux (parfois trois) niveaux de réglage
- Réglage primaire
  - assez rapide, complètement décentralisé
  - basé sur le réglage de la vitesse des machines synchrones
- Réglage secondaire (AGC)
  - plus lent et plus centralisé : vise à réduire les écarts de fréquence et de transits sur les interfaces
  - agit sur les consignes du réglage primaire

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

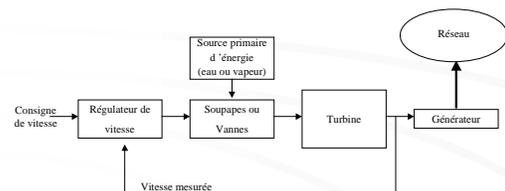
## Réglage primaire

- But répartir de façon prévisible sur un certain nombre de machines (une machine toute seule ne suffirait pas, en général) les variations de bilan de puissance
- On se sert de la fréquence comme moyen de communication entre réglages locaux (elle doit être la même partout à l'équilibre)

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

## Réglage de vitesse des machines synchrones



10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

### Réglage de vitesse d'une machine synchrone

- Caractéristique d'équilibre
  - $P = P_0 + k(w_0 - w)$  (erreur permanente)

10/25/00 ELEC-026 - 2000/2001

### Dans un système interconnecté

- A l'équilibre, toutes les machines tournent à la même vitesse (fréquence unique)
- ⇨ caractéristique système qui relie puissance fréquence, ou, de manière équivalente
- ⇨ écart de puissance en fonction de l'écart de fréquence
- ⇨ variation de puissance demandée se traduit par une variation de production de chaque groupe de production et une variation de la fréquence

10/25/00 ELEC-026 - 2000/2001

### AGC : automatic generation control

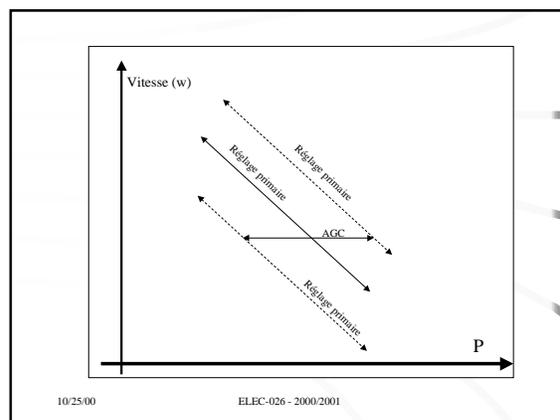
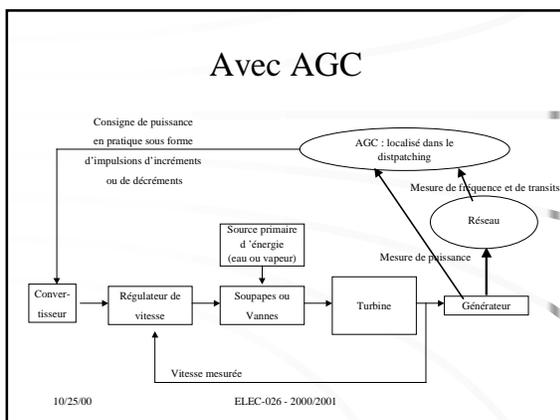
- Réglage primaire ne suffit pas car conduit à
  - erreurs permanentes de fréquence
  - erreurs permanentes de bilans de régions (groupes de consommateurs et de producteurs)
- AGC : solution « classique » à ce problème
  - corriger les erreurs de fréquence
  - corriger les erreurs de bilan
  - prise en compte de critères économiques
  - corriger les erreurs en termes d'énergie et de temps

10/25/00 ELEC-026 - 2000/2001

### AGC : suite

- Solution
  - centralisée au niveau d'une région
  - décentralisée au niveau d'une interconnexion (cf coexistence de plusieurs régions ayant chacune leur AGC)
- Problèmes potentiels
  - dynamique instable si réglage trop rapide et/ou interactions fortes entre régions
  - ⇨ réglage relativement lent
- NB: nécessité de prise en compte des pertes et des limites de sécurité (cf problème d'écoulement de puissance)

10/25/00 ELEC-026 - 2000/2001



### Dans un système dérégulé

- Le GRT est responsable du réglage de la fréquence
  - Obligation des « gros » producteurs : réglage primaire
  - Marché de réserves de réglage secondaire, tertiaire...
    - Achat de réserves par le GRT
    - Appel aux réserves (et rémunération énergie) sous des conditions pré-spécifiées
- NB: les consommateurs peuvent en principe participer aux réserves (délestage volontaire)

10/25/00 ELEC-026 - 2000/2001

### Remarques anticipatives

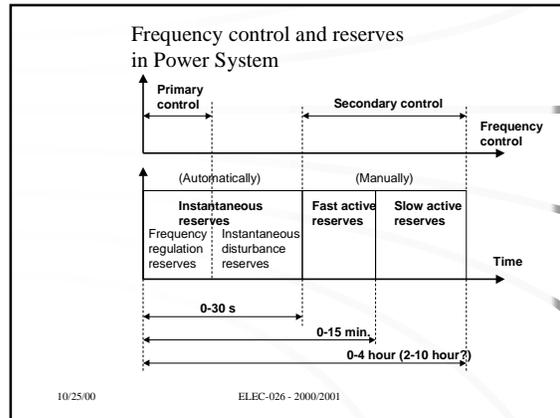
- Dans certains cas, le problème de réglage puissance/fréquence est couplé avec le problème de sécurité statique
- Dans ce cas le modèle à nœud unique n'est plus suffisant
- On peut avoir des producteurs qui sont en position stratégique (voir plus loin pour exemples)

10/25/00 ELEC-026 - 2000/2001

### Exemple : système NORDEL

- Sources
  - Cigré TF 38.02.21 Security Assessment
  - Bo Lofgren (Vattenfall, Suède)

10/25/00 ELEC-026 - 2000/2001



### Trade with reserves I

- Instantaneous active reserve**
  - Frequency regulation,  $50.0 \pm 0.1$  Hz, (deviation  $< \pm 10$  seconds)
  - Instantaneous disturbance reserve
- Fast active reserve**
  - Balance regulation within 15 minutes
- Slow active reserves**
  - Balance regulation within 2 hour ( $< 10$  hours?)
- Trade for manage bottlenecks**
  - Market splitting
  - Country trade

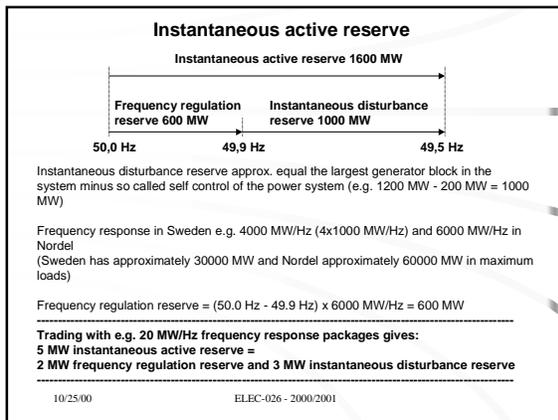
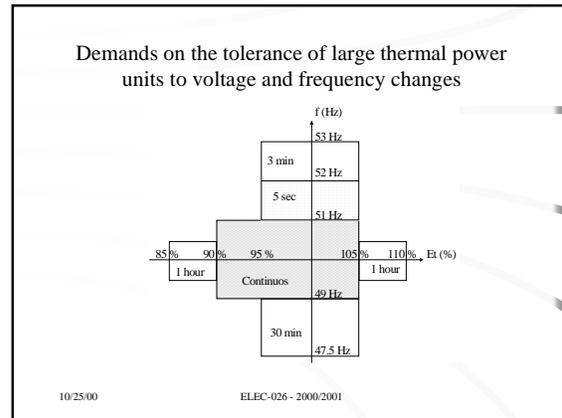
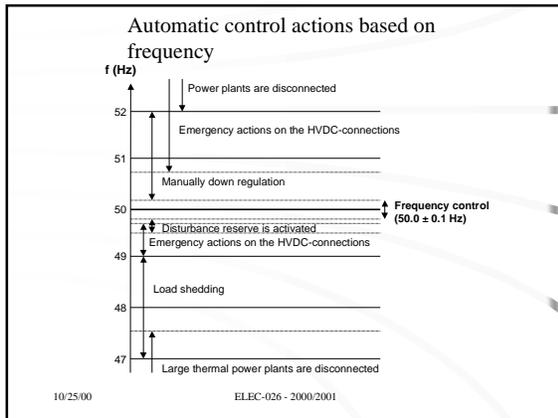
10/25/00 ELEC-026 - 2000/2001

### Trade with reserves II

**Technical specification and demands on equipment connected to the network**

- Reactive power reserves
- Black out start
- Island operations
- Disconnection of production
- Frequency load shedding

10/25/00 ELEC-026 - 2000/2001



### Réglage local de tension (intro)

- Point de vue groupe de production synchrone
  - Tension stable aux bornes est nécessaire pour un fonctionnement stable
  - Contrôle de la tension se fait au moyen du contrôle du courant d'excitation (ressource limitée, cf effets thermiques)
  - ↻ réglage primaire de la tension (rapide : fraction de sec)
  - Production de puissance réactive fonction des écarts de tension dans le réseau
  - ↻ Nécessité d'aligner les consignes de tension
  - ↻ En pratique, dans un réseau de transport le plan de tension doit être assez uniforme

10/25/00 ELEC-026 - 2000/2001

### Réglage du plan de tension (intro)

- Point de vue réseau
  - tensions élevées sont préférables (minimisation des pertes actives, stabilité...)
  - limitation physique : isolation
  - ↻ problème du réglage du plan de tension
  - ↻ coordination des différents moyens de réglage de la tension (= sources de puissance réactive)
  - ↻ groupes, bancs de condensateurs, transformateurs, topologie réseau
  - ↻ Pour bien comprendre ce problème il faut en savoir plus sur la physique des flux de puissance

10/25/00 ELEC-026 - 2000/2001

### Réglage de tension en environnement dérégulé

- Obligations de base pour les gros producteurs
- Eventuellement : achats de réserves de puissance réactive
- Marché des services auxiliaires
  - possibilité de démarrage de groupes pour soutien de la tension
  - rémunération du service

10/25/00 ELEC-026 - 2000/2001

## Ecoulements de puissance et sécurité statique

- But : modéliser, comprendre et maîtriser ce qui se passe dans le réseau à l'équilibre
- En termes de flux de puissance (ou de courants dans les branches du réseau)
- En termes de tensions
- En termes de productions et de consommations de puissance active et réactive

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

## Théorie des circuits (en régime sinusoïdal 50 ou 60Hz)

- NB : système triphasé équilibré => vision monophasée équivalente
- 2 lois de Kirchhoff (nœuds, mailles)
- lois de comportement des éléments constitutifs
  - quadripôles : les lignes et les transformateurs
  - dipôles : les générateurs et les charges
  - des modèles équivalents (réduction d'une partie du système qu'on ne souhaite pas étudier en détails)

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

## Problème de base

- Données :
  - consommations de puissance active et réactive des charges
  - productions actives des groupes (sauf balancier)
  - consignes de tension des groupes
- 2N+M Inconnues (N nœuds, M groupes)
  - tensions (module et phase rel) 2N-1
  - productions réactives des groupes, M
  - production active du nœud balancier 1
- 2N+M Contraintes d'égalité (équations d'équilibre)
  - en chaque nœud deux équations de bilan de courant (KCL) : 2N
  - égalité du module de la tension en un nœud générateur à la consigne de tension : M

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

## Commentaires

- Classement des nœuds :
  - Nœuds PQ : inconnues V, theta
  - Nœuds PV : inconnues Q, theta
  - Nœud balancier : inconnues P, Q
- Nœud balancier (slack bus)
  - artifice mathématique nécessaire pour assurer le bilan de puissance active (cf. Pertes)
  - un modèle plus physique (mais plus compliqué) ferait intervenir le réglage primaire et/ou l'AGC

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

## Extensions, généralisations

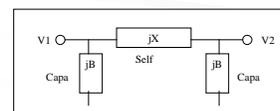
- Prise en compte des limitations de courant rotorique (influence sur le comportement du réglage primaire de tension)
  - Modèle 1 : basculement nœud PV en PQ si  $Q > Q_{max}$
  - Modèle 2 : prise en compte plus détaillée de la machine et modélisation des équations d'équilibre de celle-ci
- Charges sensibles à la tension (p.ex. impédance)
- Transformateurs à prise variable
- Facts (TCSC, SVC...)
- Divers réglages non-locaux

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

## Circuits purement réactifs Quelques remarques

- Réseaux de transport essentiellement réactifs
- En première approximation une ligne



- Ligne courte : on peut aussi négliger la partie capacitive
- Transfo : essentiellement une self

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

### Conséquences

- Transfert de puissance active essentiellement fonction de l'angle relatif  $V1$  vs  $V2$ 
  - $P_{12} = (V1V2/X) \sin(\delta1 - \delta2)$
  - Transfert de 1 vers 2 :  $V1$  en avance par rapport à  $V2$
- Transfert de puissance réactive essentiellement fonction de la différence entre les modules des tensions  $V1$  vs  $V2$ 
  - $Q_{12} = V1(V1 - V2)/X$
  - Transfert de 1 vers 2 :  $V1$  en module plus élevé que  $V2$
- Voir aussi Weedy...

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

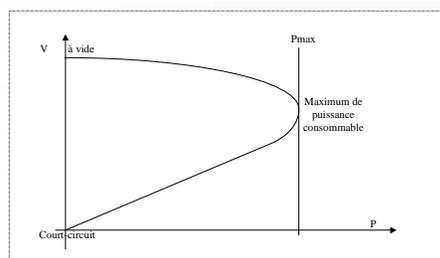
### Caractéristique statique en un nœud d'un réseau THT

- Expérience
  - On se place en un nœud du réseau
  - On fait varier l'admittance de charge :  $Y(\alpha) = \alpha Y0$ 
    - circuit-ouvert ( $\alpha = 0$ ) -> court-circuit ( $\alpha = \infty$ )
  - On observe
    - $V(\alpha)$  au nœud charge
    - $P(\alpha)$  consommée par la charge
- ⇨ Caractéristique du réseau en ce point

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

### Voilà ce qu'on observerait (en théorie)



10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

### Sécurité (en général)

- Capacité du système électrique à « survivre » à des perturbations (fortuites ou non)
- Perturbations : très diverses
  - Petites : p.ex. variations de la charge
  - Grandes : pannes, déclenchements
- Survie : notion subjective...
  - continuer à fonctionner de façon normale
  - ne pas s'écrouler (lamentablement)

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

### La sécurité dépend des

#### Causes possibles

- Etat de fonctionnement
- comportement dynamique du système
- types de perturbations
- probabilité d'occurrence

#### Conséquences probables

- surcharges thermiques
- chutes de tensions
- instabilités dynamiques
- action des protections
- intervention opérateur

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

### Comment éviter des conséquences indésirées

- En mode préventif :
  - exploiter le système avec des marges
- En mode curatif :
  - agir sur le comportement dynamique du système avant qu'il ne soit trop tard

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

### Remarques : protections

- Dispositifs automatiques qui visent à déconnecter certains éléments du réseau (pour les protéger...)
- Jouent un rôle capital du point de vue sécurité
- Exemples (on y reviendra plus loin)
  - sur-/sous-tension groupes
  - sur-/sous-vitesse groupes
  - sur-intensités : lignes, transfos, courants rotoriques
  - sous-fréquence, sous-tension : délestage de charge
  - protections de distance : court-circuits
- Différentes protections agissent avec des temps de réponse différents (qq. fractions de secondes à qq. minutes)

10/25/00 ELEC-026 - 2000/2001

### Exemple de scénario: réseau EDF

At t=0s : Loss of a corridor of 400kV lines

⇒ Overload, then tripping of three connexions :

- towards Zone 8 (225 kV) : 150 s
- towards Zone 8 (225 kV) : 150 s
- towards Zone 11 (225 kV) : 150 s

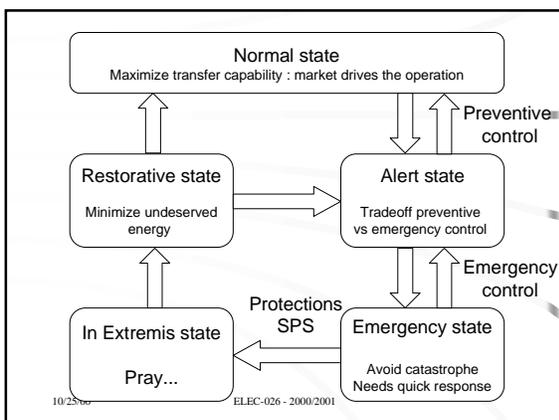
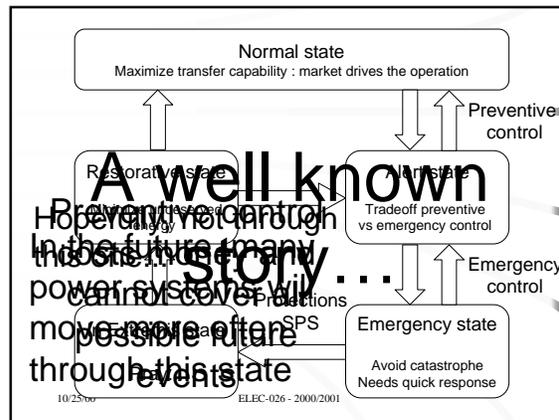
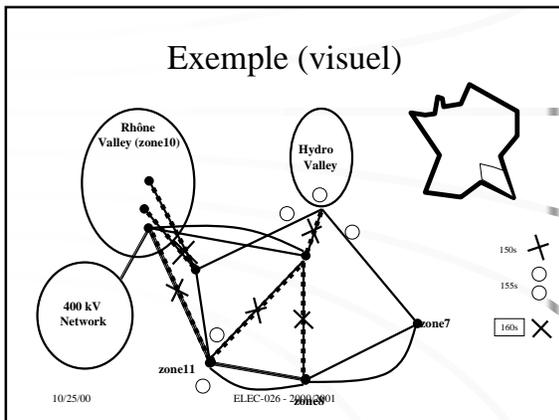
⇒ Loss of generators (total of 2500MVA lost):

- Two thermal plants on undervoltage protection : 155 s
- Three hydro plants on overspeed protection : 155 s

⇒ Overload, then tripping of the connexion towards Zone 10 (225 kV) : 160 s

⇒ Load shedding in zones 7, 8 and 11

10/25/00 ELEC-026 - 2000/2001



### Sécurité

#### Décomposition en sous-problèmes

- Partie statique : sécurité statique
- Partie dynamique : sécurité dynamique
  - Stabilité
    - locale (petites perturbations)
    - globale : angulaire et de tension...

La décomposition en statique/dynamique est contre nature du point de vue physique, mais très utile d'un point de vue pratique : voir suite du cours

10/25/00 ELEC-026 - 2000/2001

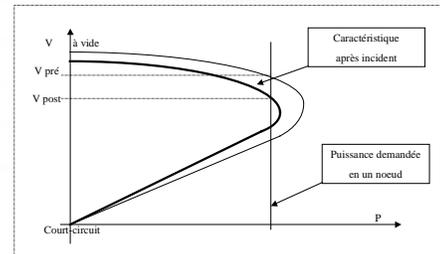
## Sécurité statique

- On s'intéresse à l'existence et à la viabilité du point d'équilibre après perturbation
- Par exemple :
  - Si on perd une ligne
  - Quid des transits et des tensions après déclenchement
  - ⇒ Problème statique

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

## Illustration



10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

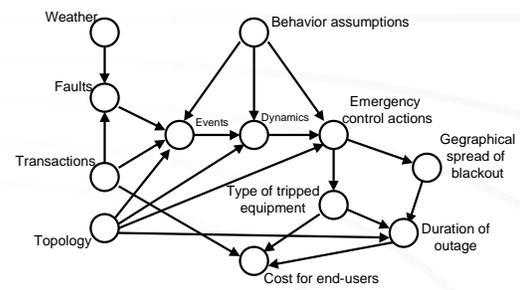
## Notion de sécurité N-1

- Le réseau est en sécurité N-1 à un moment donné
  - Si pour tout incident simple, l'équilibre long terme post-incident existe et est viable :
    - Courants < limite thermique
    - Tensions > 0.95 pu (typiquement)
    - Réserves (actives et réactives) suffisantes
- ⇒ Critère usuel d'exploitation
- ⇒ Implique sécurité N

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

## Influences in security assessment of power systems



10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001

## Plan des cours suivants

- Aspects dynamiques (éléments)
- La sécurité d'un point de vue global
- Dispatchings
  - télémesures, informatique
  - SCADA
  - Estimation d'état + prédiction de la charge
  - Optimisation : ED et OPF, UC
  - Analyse et commande de la sécurité

10/25/00

ELEC-026 - 2000/2001