

# TP Modélisation des Réseaux Electriques

## 2A B1-S8

### Répartition de puissances

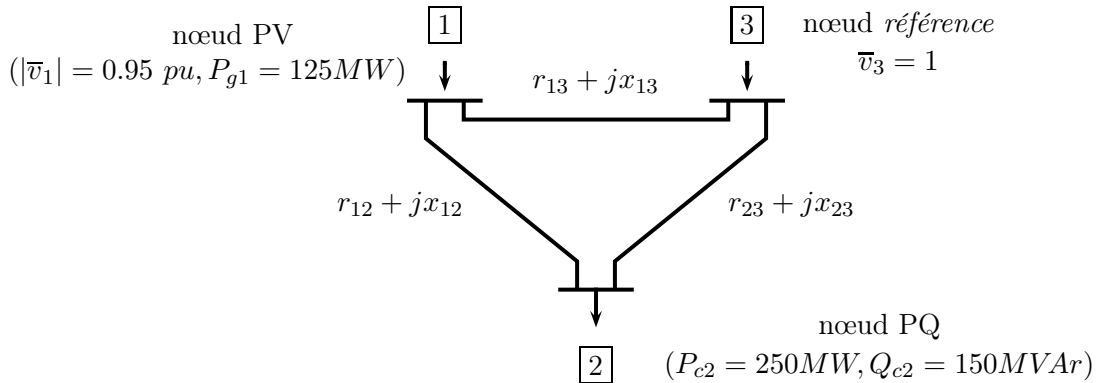
S. Dufour

Le but du TP est de se familiariser avec un problème de répartition de puissances dans un réseau à l'aide d'un package Matlab dédié : "Matpower" (distribué sous GNU General Public License, téléchargeable à partir de <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>). Ce package est disponible sous Arche (matpower7.0.zip).

Pour utiliser Matpower (s'il n'est pas déjà installé), il faut unzipper le package dans un répertoire de votre compte par exemple U:\TPreseau. Lors de l'utilisation sous Matlab, il faudra spécifier le chemin de recherche, par la commande suivante : `addpath(path,'U:\TPreseau')`. Pour calculer la répartition de puissances en utilisant le fichier de données 'troisnoeuds.m', il faut exécuter la commande `runpf('troisnoeuds')`.

## 1 Exemple didactique

Afin de se familiariser avec le logiciel, un exemple simple de réseau à 3 nœuds est proposé ('troisnoeuds.m').



$$\text{données : } \begin{cases} P_1 = P_{g1} = 125 \text{ MW} \\ P_2 = -P_{c2} = -250 \text{ MW} \\ Q_2 = -Q_{c2} = -150 \text{ MVar} \end{cases} \quad \text{inconnues : } \begin{cases} \theta_1 \\ V_2 \\ \theta_2 \end{cases}$$

La puissance apparente de base est  $S_b = 100 \text{ MVA}$ . La tension de référence pour les 3 nœuds est  $U_b = 225 \text{ kV}$ . Le nœud 1 est un nœud de tension (PV) :  $u_1 = 0.95 \text{ (pu)}$ , la puissance générée est  $P_g = 125 \text{ MW}$ . Le nœud 2 est un nœud de consommation (PQ) : la puissance consommée est  $P_c = 250 \text{ MW}$ ,  $Q_c = 150 \text{ MVar}$ . Le nœud 3 est un nœud de référence :  $\bar{u}_3 = 1 \text{ (pu)}$ .

Les connexions du réseau sont des lignes 225kV :

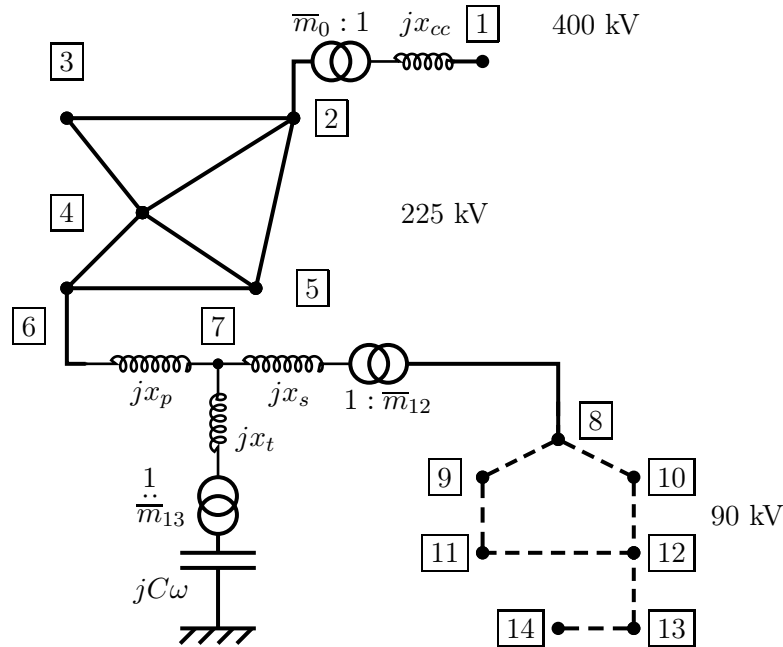
- entre 1 et 2 d'impédance  $r_{12} + jx_{12} = 0.0025 + j0.10 \text{ (pu)}$ .
- entre 1 et 3 d'impédance  $r_{13} + jx_{13} = 0.0037 + j0.15 \text{ (pu)}$ .
- entre 2 et 3 d'impédance  $r_{23} + jx_{23} = 0.0031 + j0.125 \text{ (pu)}$ .

Résoudre le problème de répartition de puissance et regarder les tensions aux nœuds et les puissances transitées sur les lignes.

## 2 Etude d'un réseau étendu

### Descriptif

Soit un réseau 400/225/90 kV de puissance apparente de base  $S_b = 100 \text{ MVA}$ .



Les nœuds se répartissent comme suit :

- $\boxed{1}$  : de tension, ce nœud sert de référence.
- $\boxed{3}, \boxed{11}$  : de tension
- $\boxed{2}, \boxed{4} - \boxed{10}$  et  $\boxed{12} - \boxed{14}$  : de consommation

Les tensions de base sont :

- $U_{b1} = 400 \text{ kV}$  : nœud  $\boxed{1}$
- $U_{b2} = 225 \text{ kV}$  : nœuds  $\boxed{2} - \boxed{7}$
- $U_{b3} = 90 \text{ kV}$  : nœuds  $\boxed{8} - \boxed{14}$

Les nœuds de tension ont un module de tension de  $U_1 = 416 \text{ kV}, U_3 = 229.5 \text{ kV}, U_{11} = 89.1 \text{ kV}$ .

### Puissances

Les puissances actives générées sont  $P_{g3} = 80 \text{ MW}, P_{g11} = 20 \text{ MW}$ .

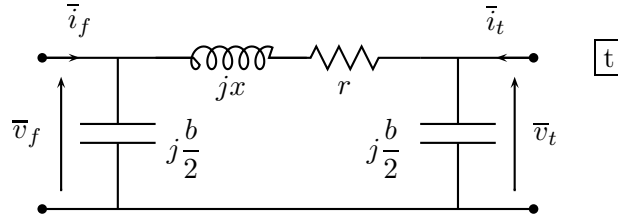
Les puissances consommées aux nœuds sont :

noeuds	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$P_d$ (MW)	0	10	0	35	60	50	0	15	10	14	0	12	12	8
$Q_d$ (MVAR)	0	40	0	40	20	25	0	5	6	8	0	9	8	5

## Lignes électriques

Les lignes constituant le réseau  $225kV$  sont représentées sur le dessin en trait plein, celles du réseau  $90kV$  en trait pointillé.

Le modèle de ligne reliant le nœud  $\boxed{f}$  au nœud  $\boxed{t}$  est le modèle en  $\Pi$  qui comporte une résistance  $r$  (pu) en série avec une réactance  $x$  (pu), une admittance shunt  $b$  (pu).



Par souci de simplification, on prendra

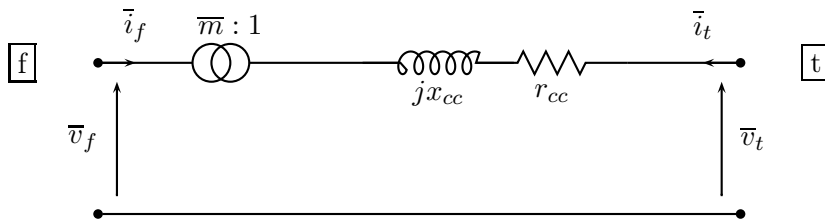
- pour les 7 lignes  $225\text{ kV}$  :  $r + jx = 1.3 + j18\Omega$ ,  $b = 1.57 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$
- pour les 7 lignes  $90\text{ kV}$  :  $r + jx = 1.5 + j21\Omega$ ,  $b = 1.41 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$

## Transformateurs

Le transformateur  $400/225\text{ kV}$  reliant les nœuds  $\boxed{1}$  et  $\boxed{2}$  a une puissance de  $250\text{ MVA}$ , et une réactance de court-circuit de  $x_{cc} = 12.5\%$ , son rapport de transformation est  $\overline{m}_0 = 1$ .

Le transformateur  $225/90kV$  comporte un tertiaire  $20kV$ , a une puissance de  $100\text{ MVA}$ . Il est représenté entre les nœuds  $\boxed{6} - \boxed{7} - \boxed{8}$ , par ses trois enroulements primaire, secondaire et tertiaire. Les valeurs des réactances  $x_p, x_s, x_t$  sont de  $12\%, 10\%, 10\%$ , et les rapports de transformation sont  $m_{12} = 1.15$  et  $m_{13} = 1$ .

Le modèle de transformateur reliant le nœud  $\boxed{f}$  au nœud  $\boxed{t}$ , qui comporte une résistance  $r_{cc}$  (pu) en série avec une réactance  $x_{cc}$  (pu) avec un rapport de transformation complexe  $\overline{m}$  (de module ou *ratio*  $\overline{m}$  en pu, d'argument ou *angle*  $\theta$  en degrés) est le suivant dans *Matpower* :



I) Le tertiaire du transformateur 225/90/20 kV est déconnecté du réseau. Analyse de la répartition de puissance.

1) Déterminer les grandeurs réduites du problème, puis établir les données des matrices *bus*, *gen*, *branch*.

2) Résoudre le problème de répartition de puissance à l'aide de Matpower (*runpf*). Commenter.

3) Modifier les valeurs des modules des tensions des nœuds 1, 3 et 11 (dans une plage de  $\pm 20\%$ ), ainsi que sur les valeurs des rapports de transformation  $m_0$  et  $m_{12}$ . Commenter. Enlever les admittances shunt  $b$  des lignes. Commenter.

II) Correction du plan de tension

1) Le tertiaire du transformateur 225/90/20 kV est connecté : on représentera le tertiaire par une susceptance shunt  $B_s$  au nœud 7 en MVAR injecté (pour  $v_7 = 1$  (*pu*)). Le générateur 11 est déconnecté. Mettre le réactif du nœud 14 à zéro ( $q_{14} = 0$ ). Observer que la tension du nœud 14 a chuté. Injecter du réactif dans le réseau par la susceptance shunt  $B_s$  au nœud 7 en MVAR injecté (pour  $v_7 = 1$  (*pu*)), pour que la tension du nœud repasse à 0.9 (*pu*). Conclure.

2) Le tertiaire du transformateur 225/90/20 kV est déconnecté. Reprendre la question précédente en injectant du réactif au nœud 10 par une susceptance shunt  $B_s$  en MVAR injecté (pour  $v_{10} = 1$  (*pu*)). Conclure.

III) Analyse  $N - 1$

Commenter les résultats de l'analyse de risques  $N - 1$  ( $N - 1$  *contingency analysis*) sur les lignes 90kV.

IV) Analyse de sensibilité

Faire l'analyse de sensibilité sur les nœuds (*CPF*). Observer en particulier le nœud 14. Donner la valeur cible de  $\lambda$  de la limite de stabilité.

### 3 Utilisation de Matpower

Matpower est un greffon Matlab qui permet le calcul de la répartition des puissances (power flow), de la répartition des puissances optimale (optimal power flow), et l'analyse de sensibilité (continuation power flow). La version courante est la 6.0.

Pour utiliser Matpower, il faut le télécharger, l'installer sous un répertoire, par exemple '/home/dufour/reseau/', puis ajouter les répertoires suivants aux chemins de recherche

- sous Linux :  
`path(path, '/home/dufour/reseau/matpower6.0');`  
`path(path, '/home/dufour/reseau/matpower6.0/t');`
- sous Windows :  
`path(path, ' U : \ reseau \ matpower6.0 ');`  
`path(path, ' U : \ reseau \ matpower6.0 \ t');`

Matpower utilise des données sous forme de structures de données (par exemple *mpc*) qui se décline en :

- *mpc.baseMVA* donne la puissance apparente de base (en MVA)
- *mpc.bus* donne les informations sur les nœuds (matrice 13 colonnes)
- *mpc.gen* donne les informations sur les générateurs (matrice 10 colonnes)
- *mpc.branch* donne les informations sur les lignes et transformateurs (matrice 17 colonnes)

Les colonnes de ces trois matrices sont détaillées dans les tableaux ci-dessous. Ainsi, *mpc.bus(:,8)* renseigne les modules des tensions aux nœuds qui servent d'initialisation au calcul itératif de la répartition de puissances.

<i>mpc.bus</i>	<i>n°col.</i>	<b>Bus Data Format</b>
BUS_I	1	bus number (1 to 29997)
BUS_TYPE	2	bus type : PQ bus = 1, PV bus = 2, reference bus = 3, isolated bus = 4
PD	3	Pd, real power demand (MW)
QD	4	Qd, reactive power demand (MVar)
GS	5	Gs, shunt conductance (MW (demanded) at V = 1.0 p.u.)
BS	6	Bs, shunt susceptance (MVar (injected) at V = 1.0 p.u.)
BUS_AREA	7	area number, 1-100
VM	8	Vm, voltage magnitude (p.u.)
VA	9	Va, voltage angle (degrees)
BASE_KV	10	baseKV, base voltage (kV)
ZONE	11	zone, loss zone (1-999)
VMAX	12	maxVm, maximum voltage magnitude (p.u.)
VMIN	13	minVm, minimum voltage magnitude (p.u.)

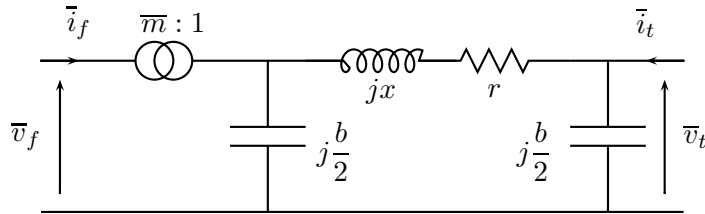
Les colonnes 7, 11, 12, 13 de *mpc.bus* ne seront a priori pas prises en compte dans le calcul.

<i>mpc.gen</i>	<i>n°col.</i>	<b>Generator Data Format</b>
GEN_BUS	1	bus number
PG	2	Pg, real power output (MW)
QG	3	Qg, reactive power output (MVar)
QMAX	4	Qmax, maximum reactive power output (MVar)
QMIN	5	Qmin, minimum reactive power output (MVar)
VG	6	Vg, voltage magnitude setpoint (p.u.)
Mbase	7	mBase, total MVA base of this machine, defaults to baseMVA
GEN_STATUS	8	status, > 0 - machine in service, <= 0 - machine out of service
Pmax	9	Pmax, maximum real power output (MW)
Pmin	10	Pmin, minimum real power output (MW)

Les colonnes 4, 5, 7, 9 et 10 de *mpc.gen* ne seront a priori pas prises en compte dans le calcul.

Les colonnes 6, 7, 8 de *mpc.branch* ne seront a priori pas prises en compte dans le calcul.

<i>mpc.branch</i>	<i>n°col.</i>	Branch Data Format
F_BUS	1	f, from bus number
T_BUS	2	t, to bus number
BR_R	3	r, resistance (p.u.)
BR_X	4	x, reactance (p.u.)
BR_B	5	b, total line charging susceptance (p.u.)
RATE_A	6	rateA, MVA rating A (long term rating)
RATE_B	7	rateB, MVA rating B (short term rating)
RATE_C	8	rateC, MVA rating C (emergency rating)
TAP	9	ratio, transformer off nominal turns ratio ( = 0 for lines ) (taps at 'from' bus, impedance at 'to' bus, i.e. if r = x = 0, then ratio = Vf / Vt)
SHIFT	10	angle, transformer phase shift angle (degrees), positive => delay
BR_STATUS	11	initial branch status, 1 - in service, 0 - out of service
ANGMIN	12	minimum angle difference $\theta_f - \theta_t$ (degrees)
ANGMAX	13	maximum angle difference $\theta_f - \theta_t$ (degrees)
PF	14	real power injected at 'from' bus end (MW)
QF	15	reactive power injected at 'from' bus end (MVar)
PT	16	real power injected at 'to' bus end (MW)
QT	17	reactive power injected at 'to' bus end (MVar)



Modèle ligne-transformateur

### Utilisation simple :

L'exécutable *runpf* (pour run power flow) permet le calcul de la répartition de puissances. Son exécution *results=runpf('troisnoeuds')* rend les resultats via une base de données *results* qui comporte 3 matrices *results.bus*, *results.gen*, *results.branch*.

### Utilisation avancée :

Il est possible de charger la structure de données contenue dans le fichier '*nomfichier*' par :

- *donnees=loadcase('nomfichier')*
- *results=runpf(donnees)*

Cela permet de modifier la structure de données pour la réutiliser ultérieurement.

*runpf* s'utilise de manière avancée par :

*[results, success] = runpf(casename, mpopt, fname, solvedcase)*

Les entrées sont :

- *casename* : le nom du fichier considéré '*nomfichier*' ou celui de la structure de données *donnees*.
- *mpopt* : les options de *runpf*
- *fname* : nom du fichier pour le stockage des résultats sous forme de tableau
- *solvedcase* : nom du fichier pour le stockage des données et résultats sous une forme réutilisable par Matpower

Les options *mpopt* sont données (liste non exhaustive) par

- *'pf.alg'* le choix du solver ('NR'=Newton,'FDXB','FDBX'=découplage,'GS'=Gauss Seidel),
- *'pf.nr.max\_it'* le nombre d'itérations maximum (ou *'pf.fd.max\_it'*, *'pf.gs.max\_it'*),
- *'pf.enforce\_q\_lims'* la mise de contraintes sur le réactif (0=sans contraintes,1=avec contraintes simultanées,2=avec une contrainte),
- *'pf\_dc'* la résolution en DC ou AC (0=AC, 1=DC) ..

Les sorties sont alors une base de données (*results*) et un entier (*success*). La base de données *results* contient notamment un réel (*results.baseMVA*), et des matrices (*results.bus*, *results.gen*, *results.branch*).

L'introduction de *define\_constants* dans le fichier *'nomfichier'* permet d'introduire les noms dans les structures de données : il est alors possible d'utiliser *results.bus( :, VM)* au lieu des numéros *results.bus( :,8)*.

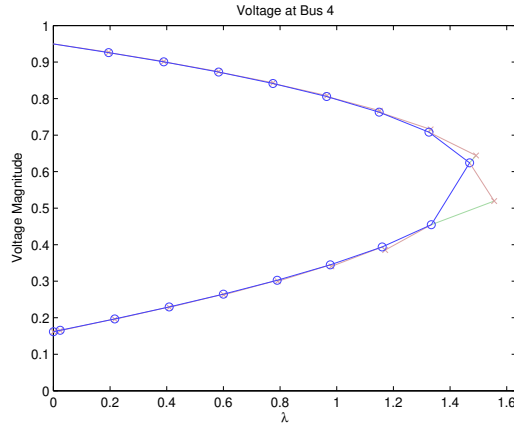
### Utilisation de l'analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité de la version 6.0 se fait via l'exécutable *runcpf* (run continuation power flow) :

*results = runcpf(basecasedata, targetcasedata, mpopt).*

La fonction exemple *'troisnoeudscpf'* utilise *runcpf* :  
*troisnoeudscpf('nomfichier',num,incr)*

Elle a pour arguments le nom du fichier à considérer (comme *'troisnoeuds'*), le numéro de noeud considéré, et le facteur maximum d'incrément de puissance (> 1).



La figure ci-dessus représente l'analyse de sensibilité du réseau *'troisnoeuds'* au noeud *num=2* pour un incrément *incr=2*.