

# Étude de la stabilité transitoire en fréquence du réseau sud de la République Démocratique du Congo

## Study of the transitory frequency stability of the southern network of the Democratic Republic of Congo

**KYONI NKULU Idriss**  
Université de Lubumbashi  
Lubumbashi  
idrisskyoni@yahoo.fr

**NTAMBWE SAPU Aaron**  
Université de Lubumbashi  
Lubumbashi  
aronsapu@gmail.com

**MULUMBA KABASELE**  
**Célestin**  
Université de Lubumbashi  
Lubumbashi  
celestinmulumb@gmail.com

### **RESUME**

Le parc de production ainsi que le réseau électrique Sud Katanga sont vieux de plus d'un demi-siècle. Depuis une dizaine d'années, il y a une forte augmentation de la demande énergétique due à l'accroissement des activités industrielles (principalement minières) dans la région où est implanté le réseau sud Katanga.

L'objectif de cette communication est d'évaluer la stabilité transitoire en fréquence du Réseau Sud Katanga selon diverses contingences liées à la production, aux charges et aux transits. L'étude de la fréquence nous permet de prédire les conséquences de chaque contingence sur l'adéquation entre la production et la consommation. Les scénarios simulés sont la perte brusque de production de chaque centrale, la perte brusque des charges importantes, les courts-circuits et les défauts de ligne à fort transit.

Pour atteindre notre objectif nous avons proposé un modèle réduit du réseau et avons simulé différentes contingences. La particularité de cette recherche réside dans la prédiction du comportement en fréquence d'un réseau vulnérable ayant un déficit important car la demande est forte par rapport au parc de production.

Mots-clefs : Etude, Stabilité, Transitoire, Fréquence, Réseau et Katanga.

### **ABSTRACT**

The South Katanga Power Grid is more than half a century old. Over the past ten years, there has been a sharp increase in energy demand due to the increase in industrial activities (mainly mining) in the region where the South Katanga network is located.

The objective of this paper is to evaluate the transient frequency stability of the South Grid under various contingencies related to production, loads and transits. The study of frequency allows us to predict the consequences of each contingency on the adequacy between production and consumption. The simulated scenarios are the sudden loss of production for each plant, the sudden loss of large loads, short circuits, and high-transit line faults. To achieve our goal, we proposed a reduced model of the network and simulated different contingencies. The particularity of this research lies in the prediction of the frequency behavior of a vulnerable network with a significant deficit because the demand is high in relation to the production fleet.

Keywords: Study, Stability, Transient, Frequency, Network and Katanga.

## **1. INTRODUCTION**

### **1.1. Contexte**

L'Ex-province du Katanga est dotée d'un réseau complexe confronté à un dilemme entre la production qui est limitée d'une part et la demande qui est croissante d'autre part. A cette difficulté, s'ajoute un vieillissement d'infrastructures de production, de transport et les actes de vandalisme qui ont conduit à la mise hors service des certaines lignes. Avec toutes ces contraintes, il reste à savoir si le réseau peut résister aux perturbations d'un régime transitoire. (Martine F. 2003)

Tout réseau électrique est conçu de manière à fonctionner dans une plage de fréquence bien déterminée. Cette plage traduit en d'autres termes l'équilibre entre la puissance produite et celle consommée. Vu les modifications subies par le réseau (vieillesse des équipements, les actes de vandalisme qui ont changé sa configuration), il est évident de vérifier sa stabilité.

### **1.2. Objectif**

Les objectifs particuliers de cette communication sont :

- De proposer un modèle réduit dont la configuration ne s'éloigne pas du modèle réel qui prendra en compte les différents projets de la Société Nationale d'Electricité (SNEL) ;
- Prédire les points d'équilibre du réseau après avoir subi les perturbations ;
- Déterminer si ces points d'équilibres sont stables ou pas.

Pour atteindre notre objectif nous avons utilisé plusieurs scénarios qui ont été exécutés sur un modèle pour l'obtention des différents points d'équilibre. En vertu de la définition géométrique de la stabilité au sens de Lyapounov nous allons déterminer si ces points sont stables ou pas.

## **2. REVUE DE LA LITTERATURE**

Les réseaux électriques ont toujours été soumis à des contingences qui peuvent conduire à une instabilité. L'un des problèmes les plus importants lors de l'étude d'un réseau électrique complexe est celui de sa stabilité. Trois types de stabilité ont toujours été fait l'objet d'étude des chercheurs scientifiques à savoir : la stabilité de l'angle du rotor, en fréquence et en tension. L'étude de la stabilité nécessite de suivre les étapes suivantes : la détermination de l'état initial du réseau (Load flow), le développement d'un modèle mathématique des éléments du réseau, l'obtention d'une réponse transitoire et enfin l'analyse de la solution temporelle. (Hussein S. 2012)

Cette communication traite de la stabilité transitoire en fréquence qui caractérise le pouvoir de maintien du synchronisme des machines électriques d'un réseau électrique en dépit des grandes perturbations.

Quatre méthodes sont utilisées pour étudier la stabilité transitoire d'un réseau : les méthodes temporelles liées aux méthodes d'intégration numérique, les méthodes directes de Lyapounov ou énergétique, les méthodes hybrides et méthodes stochastiques. (Chulassa, P. 2000)

## **3. METHODOLOGIE**

### **3.1 Présentation du site**

Le Réseau Sud est constitué principalement de 5 centrales hydroélectriques interconnectées par des lignes haute tension de 220 kV et de 120 kV comme illustré sur la carte de la figure 1. Il s'agit de :

- ✓ Nseke avec 4 groupes, pour une puissance totale de 260 MW ;
- ✓ Busanga avec 4 groupes, pour une puissance totale de 240 MW ;
- ✓ Nzilo avec 4 groupes, pour une puissance totale de 108 MW ;
- ✓ Mwadingusha avec 6 groupes, pour une puissance totale de 72 MW ;
- ✓ Koni avec 3 groupes, pour une puissance totale de 42 MW.

D'autres projets sont en phase d'études notamment : Kipay pour une production de 125 MW à Sombwe, 46 MW à Lumbwe et Nzilo II 120MW.

Le réseau sud Katanga dispose de 83 lignes haute tension destinées au transport et de 94 transformateurs. Avec les actes de vandalisme 8 lignes de transport ont été supprimées (Nseke-RO 120kV, Sck-Fungurume 220kV,

Fungurume-Panda 220kV, Panda-Karavia 220kV, Karavia-RS 220kV, Karavia-Kasumbalesa 220kV, RC-Shilatembo 120kV, RC-Rubamine 120kV).

La figure 1 illustre la cartographie des centrales du réseau sud. (SNEL 2006).

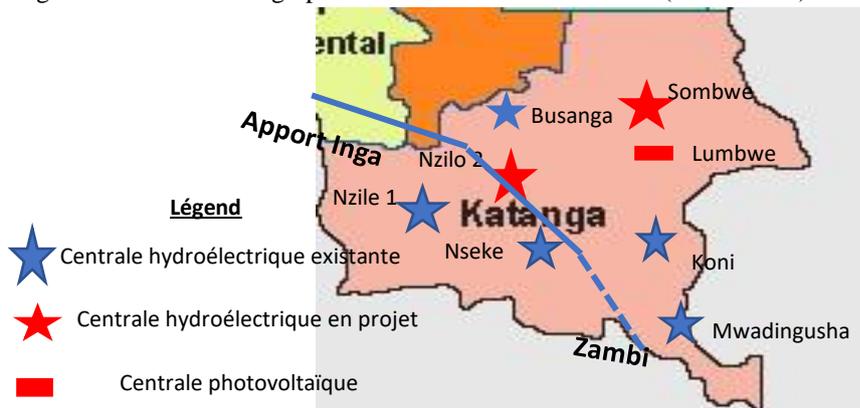


Figure 1 Carte des cartographiques centrales du Réseau Sud.

### 3.2 Démarche générale

Un modèle réduit du réseau a été adopté, les charges ont été ramenées à leurs nœuds sources. Les données de charges considérées vont de février 2021 à février 2022. Ainsi le modèle obtenu a été simulé dans le logiciel Etap pour le calcul de Load flow et la détermination des points d'équilibre pour chaque contingence (perte brusque des générateurs, le déclenchement des charges importantes, les courts-circuits et les défauts de lignes à transit de puissances importantes).

Quatre états du réseau ont été pris en considération, il s'agit de l'état initial du réseau avant vandalisme des lignes en 2021, état actuel du réseau, état futur du réseau prenant en compte les lignes en projet et celui prenant en compte les centrales en projet.

Cette étude permettra de prévenir au gestionnaire du réseau des différentes perturbations que peut subir le réseau. L'originalité de cette communication réside dans le fait que l'évaluation de la stabilité n'a jamais été envisagée depuis sa construction de ce réseau jusqu'à ce jour.

### 3.3 Construction du modèle

La construction de notre modèle se fait sur base de la réduction en chaîne, consistant à ramener les charges aux nœuds sources. Ainsi le modèle obtenu aura 34 nœuds représenté à la figure 2. En tenant compte de toutes les situations passées qui ont changé la constitution du réseau et celles en projet, nous aurons 4 états du réseau (Kyoni, I. ; Labeau P. ; Ngenda R. 2018) :

- ✓ Le premier état consiste à considérer le réseau sans projets (lignes et centrales) ;
- ✓ Le second état considère l'état actuel du réseau avec les lignes vandalisées ;
- ✓ Le troisième état prend en compte les lignes en projet ;
- ✓ Le quatrième état prend en compte les centrales en projet.

Pour chaque état du réseau énuméré ci-haut, nous aurons à simuler trois scénarios : la perte d'une centrale, la perte d'une ligne ainsi que les courts-circuits.

### 3.4 Equations du système

La fréquence du réseau est facile à régler en jouant sur la production ou la consommation. Ce réglage vise à maintenir l'adéquation entre la production et la consommation. Plus souvent c'est au niveau de la production que les réajustements s'établissent. La notion de la consommation étant liée à l'inertie du système. Nous allons nous servir du théorème du moment cinétique appliqué aux machines synchrones connectées au réseau décrit par la relation (1). (Potel, B. 2006).

$$C_m - C_e = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1)$$

Avec :

$C_m$  : est le couple mécanique en [Nm] ;

$C_e$  : est le couple électromagnétique en [Nm] ;

J : est le moment d'inertie du rotor en [ $kgm^2$ ] ;

$\Omega$  : est la vitesse angulaire en [rad/sec].

Il est plus pratique de travailler avec la puissance que le couple et aussi travailler en per-unit que dans les unités actuelles. Ainsi, nous pouvons utiliser l'équation (2).

$$J\Omega \frac{d\Omega}{dt} = P_m - P_e \quad (2)$$

L'inertie étant liée à l'énergie stockée dans la masse tournante capable de fournir la puissance S durant un temps H à la pulsation nominale est donnée par la relation (3).

$$H = \frac{1}{2} (J\omega_s^2) \frac{1}{S} \quad (3)$$

Avec H : l'inertie du système électrique en secondes,  $\omega_s$  : la pulsation nominale du système en rad/sec et S : la puissance apparente en per-unit. Cette expression exprime la robustesse du système. Si l'inertie est très importante le système sera robuste aux changements brusques de la consommation/ production. La marge de manœuvre pour la régulation de la fréquence sera aussi importante. En tirant le moment d'inertie de l'équation (3) en le ramenant dans l'équation (2), nous aboutissons à l'équation (4).

$$\frac{2HS}{\omega_s^2} \Omega \frac{d\Omega}{dt} = P_m - P_e \quad (4)$$

Sachant que  $\Omega = \frac{\omega}{p}$  et  $\omega = 2\pi f$ , la variation de la fréquence sera donnée par l'équation (5)

$$\frac{df}{dt} = \frac{P_m - P_e}{2HS} p f_o \quad (5)$$

Avec  $f$ : la fréquence du système en Hz ;  $f_o$  : la fréquence nominale en (Hz) ;  $P$  : nombre de paires de pôles ;  $P_m$  : la puissance mécanique de machine synchrone ;  $P_e$  : la puissance électromagnétique de machine synchrone ; S : la puissance apparente de machine synchrone; H : l'inertie de système électrique.

Dans ce cas nous définissons le déséquilibre du réseau comme étant une grandeur  $\Delta p$  définie par la relation (6).

$$\Delta p = \frac{P_m - P_e}{S} \quad (6)$$

Ainsi la fréquence dépendante du déséquilibre sera donnée par l'équation (7) :

$$\frac{df}{dt} = \frac{\Delta p}{2H} p f_o \quad (7)$$

Les équations (1) à (7) lient la fréquence à la puissance active et seront utilisées au paragraphe 3 dans le cas de déconnexion non prévue d'une centrale.

### **3.5 Présentation des outils d'analyse d'un réseau électrique**

#### **3.5.1 Calcul de l'écoulement de puissance**

Le calcul de l'écoulement de puissance permet de connaître les conditions de fonctionnement d'un réseau en régime permanent. Cette étude permet au gestionnaire du réseau de transport de bien prendre des bonnes décisions lors de la prévision et la planification au niveau du dispatching. (Cosson, M. 2016)

#### **3.5.2 Détermination des points d'équilibre de la fréquence du réseau**

Dans le cadre de cette communication nous simulerons la perte de chacune des centrales, le déclenchement de grande charge (de plus de 100MVA), le court-circuit aux nœuds générateurs et les défauts pour les lignes à fort transit (de plus de 100MW) pour chacun des 4 états du réseau. Nous déterminerons le point d'équilibre pour chaque contingence simulée. Ces simulations seront effectuées à l'aide du logiciel Etap. Sur base de limite théorique de fréquence, nous déterminerons si ces points sont stables ou pas. (Djairène A., Kouidri A. 2021)

#### **3.5.3 Evaluation de la stabilité**

Au sens de Lyapounov,  $x_i$  un point de repos est stable si quel que soit  $\varepsilon > 0$ , il existe un  $\delta > 0$  tel que toutes les solutions  $x_i$  satisfont à la condition  $|x_{i0}| < \delta$ , où  $i = 1, 2, \dots, n$  et vérifie l'inégalité  $|x_{i0}| < \varepsilon$ .

Si  $n=2$  géométriquement nous pouvons dire que pour tout  $t \geq 0$  quel que soit le rayon du cylindre d'axe  $t_0$ , il existe dans le plan  $t = t_0$  un voisinage  $\delta$  du point  $(0,0, t_0)$  tel que toutes les courbes intégrales  $x_1 = x_1(t)$ ,  $x_2 = x_2(t)$  issues de ce voisinage seront confinées, pour tous les  $t \geq t_0$  à l'intérieur de ce cylindre. (Lav C. 1996).

L'étude de la stabilité dans ce cadre nécessite une connaissance des différents seuils théoriques et les conséquences qui en découlent. (Potel, B. 2006).

La figure 2 donne une image du modèle réduit du réseau sud Katanga que nous allons utiliser.

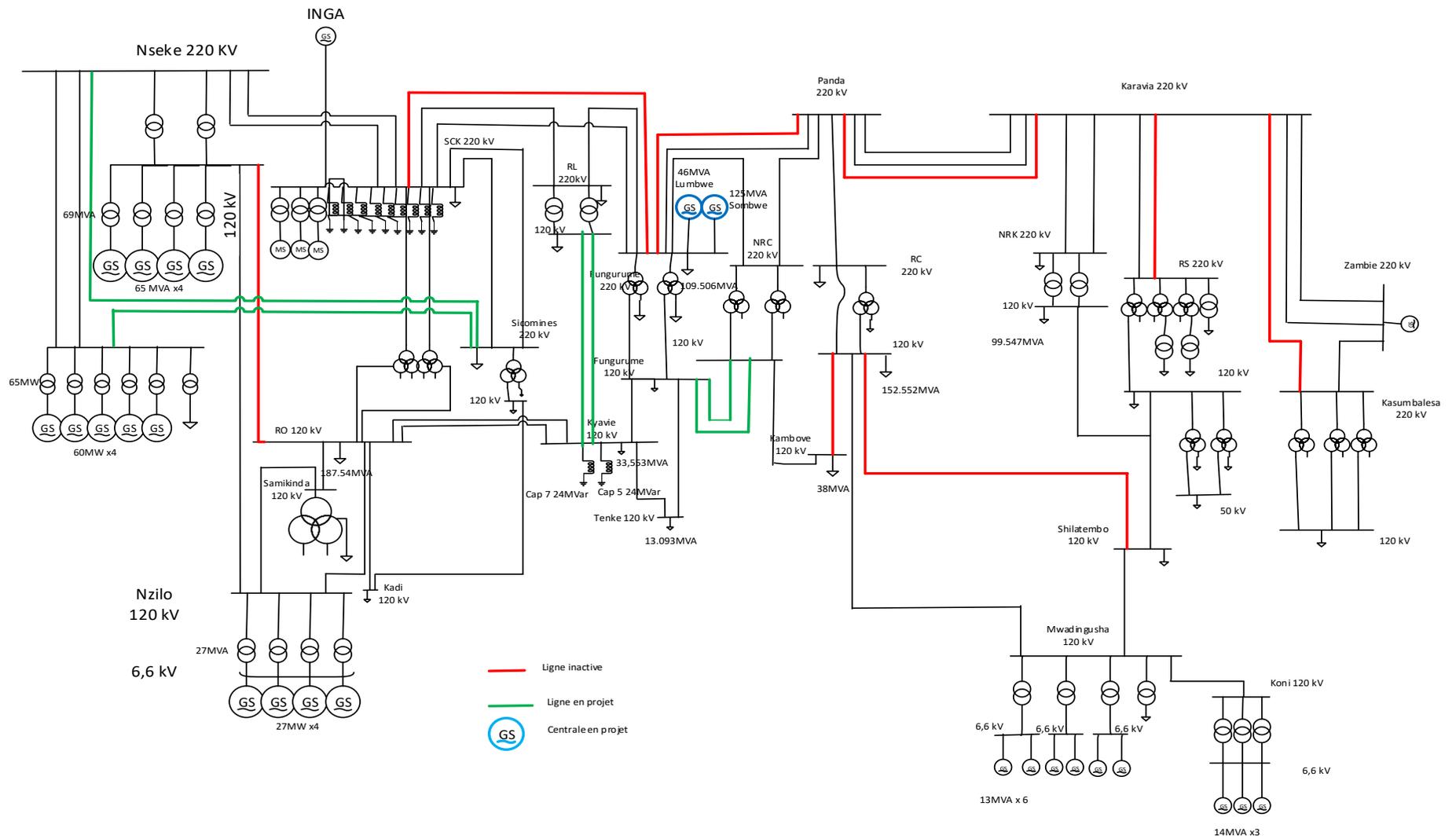


Figure 2 Modèle réduit du Réseau Sud à 34 nœuds

## 4. RESULTATS

### 4.1. Déconnexion non prévue d'une centrale Centrale Mwadingusha

Ce scénario consiste à arrêter la centrale de Mwadingusha seule et observer la fréquence aux différents nœuds et la puissance de tous les générateurs du réseau. Ce scénario sera le même pour toutes les centrales. L'allure de la courbe est présentée aux figures 3a et 3b pour la fréquence et pour la puissance respectivement.

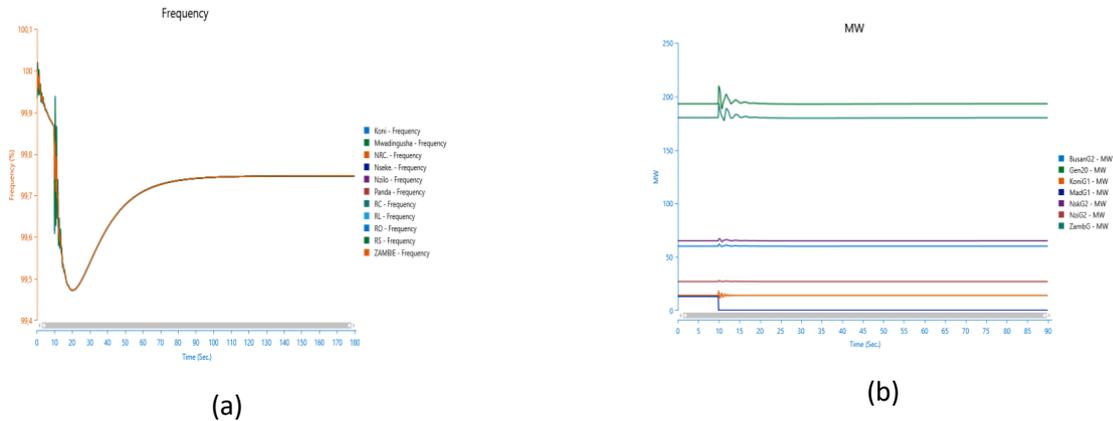


Figure 3 Evolution de la fréquence (a) et la puissance (b)

### Centrale Koni

Les courbes de perte des générateurs de Koni se présentent comme le montre les figures (4.a et 4.b). Mais l'impact est encore moins que le cas précédent. La valeur de 50.025 Hz est le plafond atteint et l'équilibre à 49.7Hz à cette valeur nous avons la régulation de la réserve primaire.

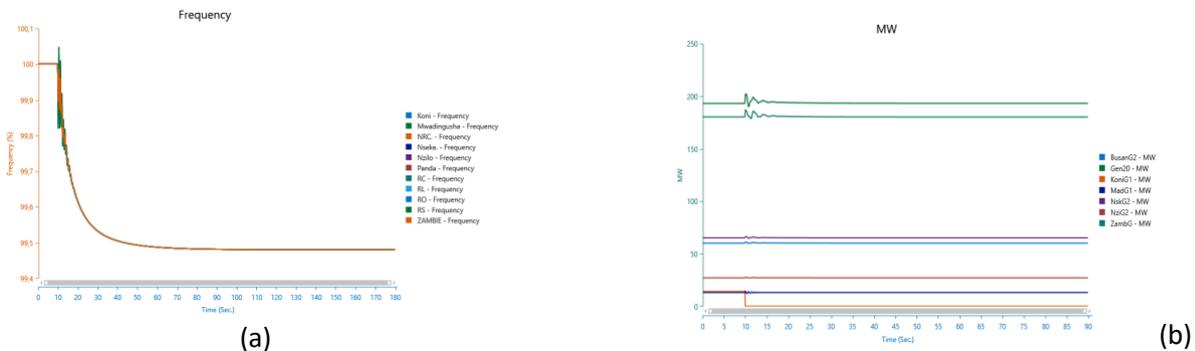


Figure 4 Evolution de fréquence (a) et la puissance (b)

### Centrale Nseke

La centrale de Nseke participe dans la régulation de l'équilibre. Son arrêt brusque entraîne des conséquences négatives non tolérables. A l'instant de l'apparition du défaut, en certain nœuds la valeur atteint 45.125Hz comme l'indique la figure (5a). Le réseau trouve son repos à une valeur de 47.25Hz cette valeur est la limite à laquelle les centrales vont se déconnecter. Les deux grandes sources du réseau sont contraintes de combler le déficit de puissance comme illustré à la figure (5b). Lors de ce scénario, la puissance générée à la Station de Conversion de Kolwezi (SCK) atteint un pic de 280MW et ZESCO 240MW. Cela est dû au fait que tous les générateurs doivent fournir plus de puissance pour couvrir le déficit.

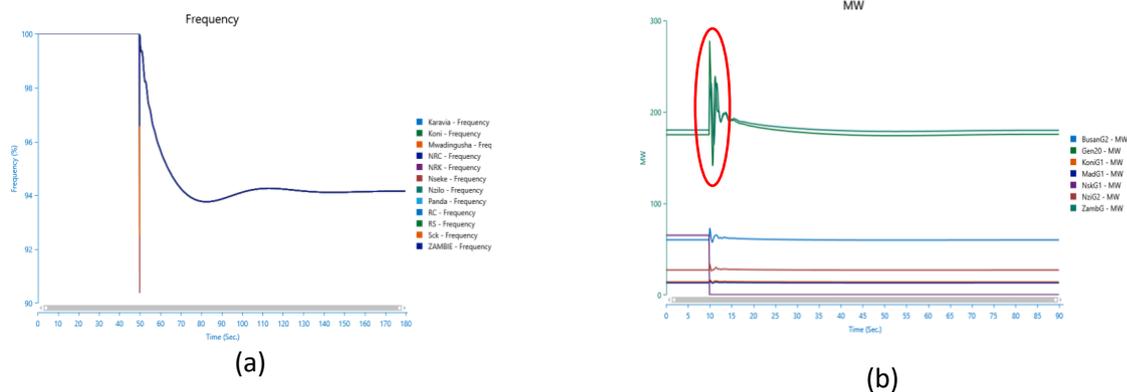


Figure 5 Evolution de la fréquence (a) et la puissance (b)

### Centrale Busanga

La centrale Busanga contribue aussi dans le maintien de l'équilibre de la fréquence. Son influence sur la fréquence du réseau est remarquée par l'arrêt brusque de ses générateurs. Dans les premiers instants de la contingence, la fréquence baisse jusqu'à 94.6% de la fréquence nominale comme le montre la figure 4.6. Pour aller trouver le repos à une valeur de 47.6Hz. Comme nous pouvons voir sur la figure (6.a). SCK atteint un pic de 280MW et ZESCO 230MW. Tous les générateurs se sont comportés comme dans le cas précédent, la figure (6.b).

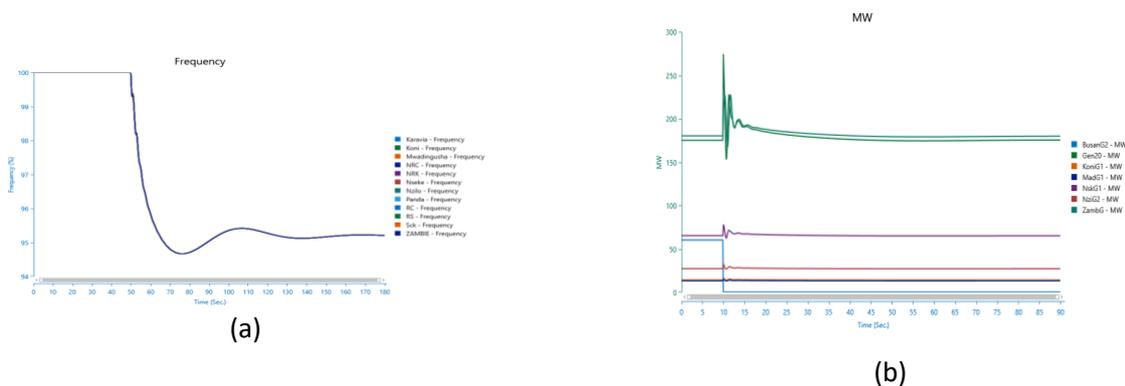


Figure 6 Evolution de la fréquence (a) et la puissance (b)

### Centrale Nzilo

L'impact de chaque centrale sur le réseau dépend de sa capacité de production en rapport avec l'excédent de la puissance produite totale du réseau. Lors du défaut ou de l'arrêt brusque des générateurs de la centrale Nzilo, la fréquence a atteint une valeur basse de 48.8Hz et l'équilibre à 49.3 Hz lu sur la courbe à la figure (7.a). Pas de forte variation de la puissance lors de la contingence comme observer sur la figure (7 b)

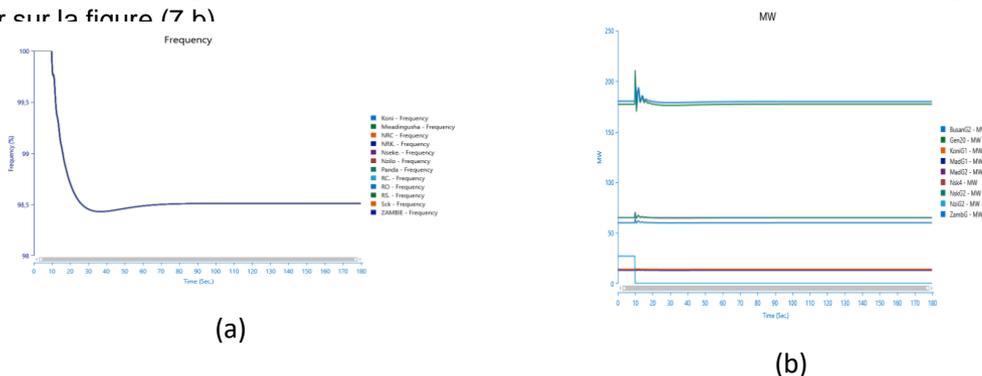


Figure 7 Evolution de la fréquence (a) et la puissance (b)

**La ligne Inga**

La ligne Inga est la principale alimentation du réseau sud. Avec ces 577 MW, elle couvre la plus grande partie de la charge du réseau. Sa coupure présente des conséquences très néfastes sur le reste du système. Sur la figure (8a) nous pouvons voir la fréquence atteindre une valeur de 45Hz et le point de repos se trouve à une valeur de 45.3Hz. Hormis Koni et Mwadingusha la production des autres centrales ont pu augmenter en vue de subvenir au déficit figure (8b).

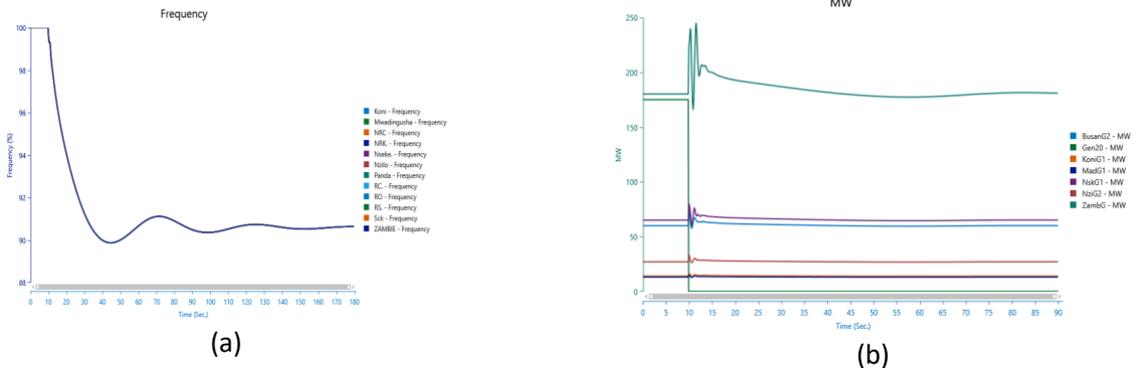


Figure 8 Evolution de la fréquence (a) et la puissance (b)

Nous remarquons que pour la déconnexion des centrales, le réseau reste stable pour la déconnexion de Koni, Mwadingusha, Nzilo à l'état 1 et Lumbwe comme l'indique le tableau 1. Pour le reste de centrales cette contingence crée l'instabilité du réseau. D'après les résultats présentés dans le tableau 1, seuls ceux qui sont en vert définissent l'état stable du réseau.

Tableau.1 les points d'équilibre de la fréquence pour divers scénarios d'arrêt des générateurs

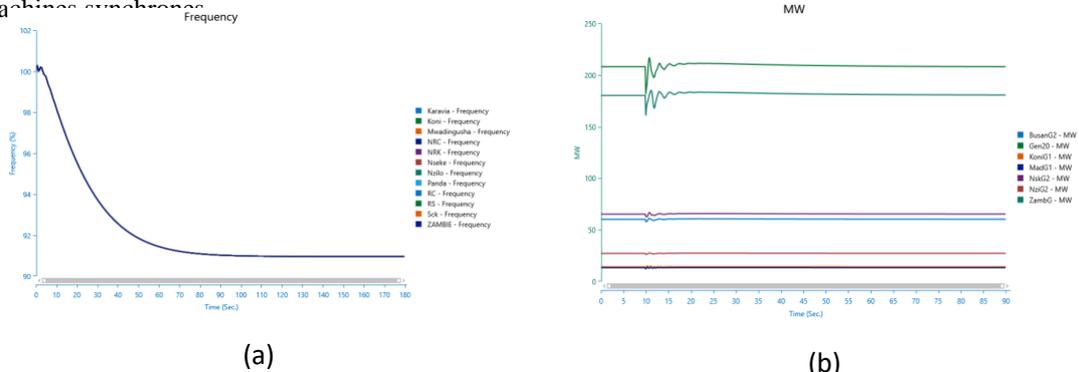
Arrêt brusque des générateurs				
Centrales	Etat 1	Etat 2	Etat 3	Etat 4
Busanga	47.6	45.6	45.6	46
Koni	49.7	49.9	49.7	49.7
Lumbwe			50.9	50.9
Mwadingusha	49.9	50.1	49.75	49.8
Nseke	46.3	45.6	45.6	46.1
Nzilo	49.3	48.7	48.7	48.7
Inga	45.3	44.2	44.2	44.2
Sombwe			56.1	53.2
Zambie	52.5	51.5	51.2	51.24

**4.2. Déclenchement de Grande charge**

**Déclenchement de 152.23 MW au répartiteur centre (RC)**

Lors d'une perte de 152.23 MW au répartiteur centre, nous observons une oscillation dans les 5 premières secondes avant qu'elle ne baisse jusqu'à une valeur d'équilibre de 91% soit 45.5 Hz (figure 9a et 9b).

Une situation qui s'avère très compromettante pour le fonctionnement des équipements du réseau, en particulier les machines synchrones.



(a)

(b)

Figure 9 Evolution de la fréquence (a) et la puissance (b)

**Déclenchement de 187.54MW au répartiteur ouest (RO)**

Pour la perte de 187.54 MW de charge au le répartiteur Ouest, la fréquence du réseau subit un bondissement de 50.8Hz pour retrouver son équilibre à 49.9Hz comme illustré à la figure (10.a et 10.b). Une situation qui est contraire à celle de 152,23 MW au RC.

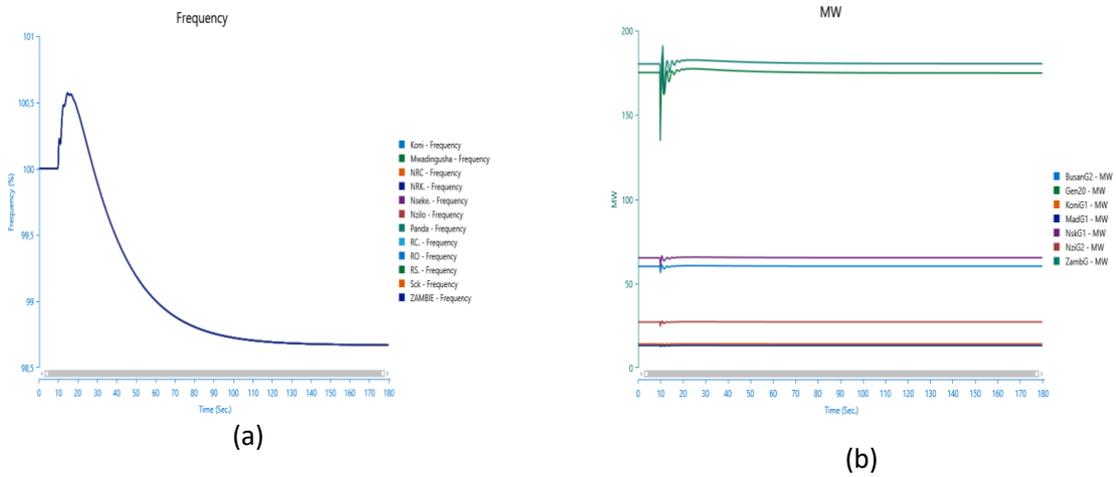
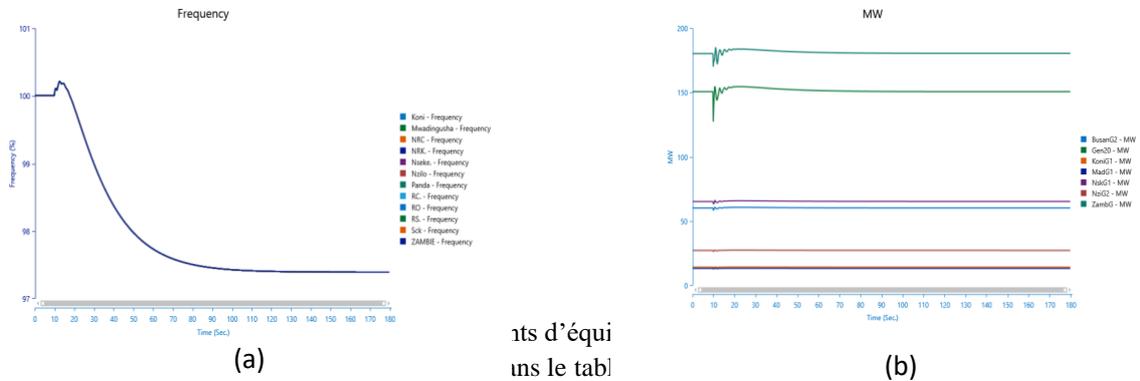


Figure 10 Evolution de la fréquence (a) et la puissance (b)

**Déclenchement de 99,507MW au nouveau répartiteur Kasapa (NRK)**

Au nœud NRK la perte d'une charge de 99.507MW conduit à une baisse de fréquence jusqu'à une valeur d'équilibre 48.3 Hz à l'état 1 comme à la figure (11.a) et. Les centrales ayant entré dans le réglage pour trouver l'équilibre sont Nseke, Nzilo, Inga et ZESCO comme illustré à la figure (11.b).



Pour de 1 de l' la cc.....

nts d'équi  
uns le tabl  
causée pè

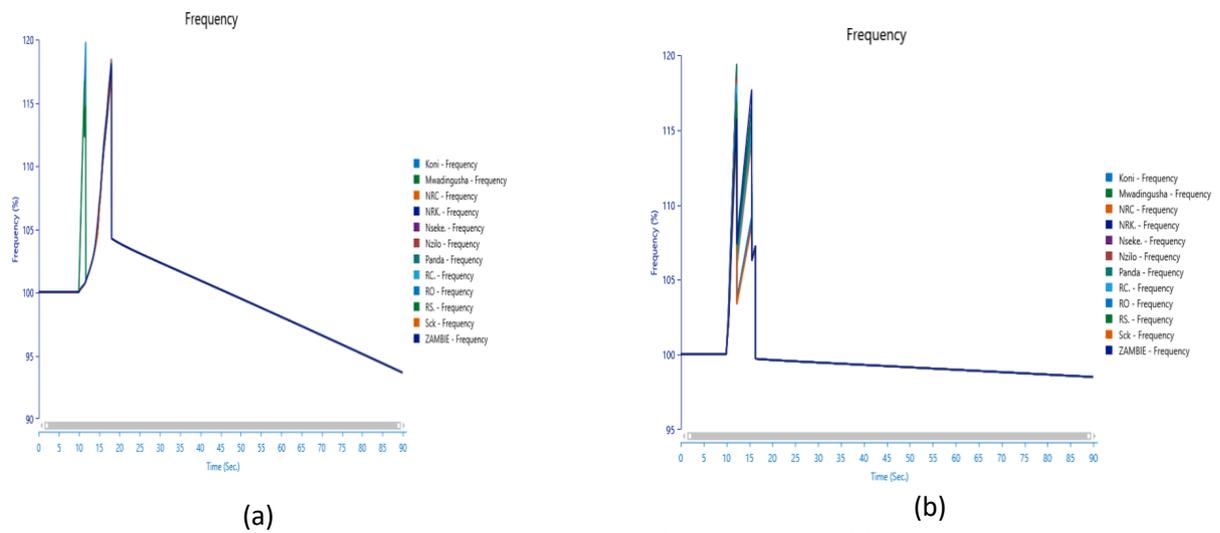
Figure 11 Evolution de la fréquence (a) et la puissance (b)

**Tableau 2 Points d'équilibre de la fréquence pour divers scénarios de déclenchement de la charge**

Perte de la charge				
Charge	Etat 1	Etat 2	Etat 3	Etat 4
187.54 MW /RO	49.9	49.7	50.3	50.2
152.552 MW/RC	45.5	47.7	48.7	48.9
109.502MW/FGM	48.6	48.8	48.8	49.3
99,547MW/NRK	48.3	48.3	48.6	48.8

### 4.3. Court-circuit et défaut des lignes

À près le défaut au nœud Busanga la fréquence du courant a atteint une valeur de 60Hz une valeur très critique pour le réseau. Aucun équipement intégré dans ce réseau n'est conçu pour fonctionner dans ces conditions. Comme illustré sur la figure (12a) la conséquence est qu'après ce scénario la fréquence baisse progressivement.



**Figure 12 Evolution de la fréquence (a) et la puissance (b)**

Un défaut sur cette ligne qui transite 119MW a une même allure que celle d'un court-circuit. La fréquence s'écroule après avoir atteint une valeur de 60Hz comme l'indique la figure (12b).

## 5. DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Les scénarios ont été simulés pour les 4 états du réseau dont les résultats nous renseignent ce qui suit : lors d'un arrêt d'une des centrales, le réseau maintient sa stabilité en fréquence en retrouvant le nouveau point d'équilibre dans une fourchette comprise entre 49Hz et 51Hz après en moyenne 80 secondes en cas d'arrêt au niveau de Koni, Mwadingusha et Nzilo à l'état 1. Au contraire, le réseau se dégrade en stabilité jusqu'à 42.2 HZ en cas d'arrêt des autres centrales et les cas de court-circuit sont les plus défavorables.

Le réseau garde son niveau de stabilité lors d'une perte de charge dans la zone Ouest et devient instable dans la zone Sud et centre. Au vu de tous ces résultats, les projets de construction des nouvelles lignes ainsi que l'investissement du parc de production permettront au réseau de retrouver les points d'équilibre stable et de réduire le temps de réponse pour toutes les contingences à l'exception des courts-circuits. Nous souhaiterons que la stabilité de l'angle du rotor et de tension soit étudiée.

## 6. CONCLUSION

L'étude de la stabilité transitoire en fréquence du réseau sur les 4 états ont fourni des résultats très intéressants pouvant servir dans la conduite et la planification du réseau. Les nouvelles lignes et investissements devraient tenir compte de ces résultats pour retrouver l'équilibre du réseau mais pour les cas des courts-circuits, il est difficile de trouver l'équilibre, la protection devrait agir.

## **7. REMERCIEMENTS**

Nos remerciements s'adressent au Directeur Provincial de la Société Nationale d'Electricité du réseau sud de nous avoir fourni les informations et les données nécessaires pour mener à bien cette recherche, au corps scientifique de l'université de Lubumbashi et à tous les lecteurs pour leur remarques combien pertinentes pour la finalisation de ce papier.

## **8. BIBLIOGRAPHIE**

[1] Chulassa, P. 2000-Stabilité d'un réseau de transport avec pole de production et de consommation éloignés en période de forte croissance. Thèse Institut national polytechnique de Grenoble.

[2] Cosson, M. 2016-Stabilité du réseau électrique de distribution. Analyse du point de vue automatique d'un système complexe. Thèse, Université paris Saclay p30

[3] Cracium. D. 2010-Modélisation équivalents dynamiques des réseaux électriques. Thèse Université de Grenoble p11

[4] Etienne M., Yann R., Sterpu S., 2010 Réglage de la fréquence dans un environnement libéralisé

[5] Faillilou D. 2018-Analyse probabilistes pour l'étude des réseaux électriques de distribution. Thèse Université paris-saclay.

[6] Kyoni, I. ; Labeau P. ; Ngenda R. 2018-Stratégie d'amélioration de la sécurité d'approvisionnement électrique de la province du Katanga.

[7] Lav. C 1996. On quadratic Liapunov functionals for linear difference equations in linear algebra and its applications. P 41-64

[8] Martine F 2003-Renforcement de l'interconnexion électrique Inga-Zambie rapport du bureau de coordination des projets SNEL.

[9] Potel, B. 2006-Evolution du mécanisme de délestage fréquence-métrique ; thèse, Université Grenoble Alpes p 37, 46-48

[10] SNEL 2006-Projet de développement du marché pour la consommation domestique et à l'exploitation. Rapport du bureau de coordination des projets SNEL.

[11] Trujillo, C. 2020-Electrification de la RDC à la recherche de piste de solution. Rapport phase 1 du bureau de coordination des projets SNEL.