

Système complet réel

Advanced Lab in Electrical Energy Systems

Juin 2025

Table des matières

1	Introduction	3
2	Réseau	4
2.1	Schéma général	4
2.2	Différents composants	5
2.2.1	Machine à courant continu	5
2.2.2	Machine synchrone	6
2.2.3	Résistance	7
2.2.4	Capacité	7
2.2.5	Machine asynchrone	8
3	Test de mise en réseau de machines	9
3.1	Réseaux de 2 machines chacune équipée de contrôles en vitesse et en tension	9
3.2	Réseaux de six machines	10
4	Mise en réseau finale	12
4.1	Machine avec contrôle en vitesse	12
4.1.1	Rôle dans le réseau	12
4.1.2	Connexion au réseau	12
4.1.3	Ajout de charge au réseau	12
4.1.4	Répartition de la puissance active	15
4.2	Machine avec contrôle en tension	16
4.2.1	Rôle dans le réseau	16
4.2.2	Ajout de charge au réseau	17
4.2.3	Répartition de la puissance réactive	17
4.3	Machines avec contrôle manuel	19
4.3.1	Motivation pour l'utilisation de machines non contrôlées	19
4.3.2	Rôle dans le réseau	20
4.3.3	Connexion au réseau	20
4.4	Résultat de la mise en réseau et mesure	20
4.4.1	Discussion et amélioration des mesures	22
5	Conclusion	23
6	Annexe	24
6.1	Mesures des puissances	24

1 Introduction

Ce projet a été développé dans le cadre du cours "Advanced Lab in Energy Systems" et porte sur la mise en œuvre et l'analyse d'un réseau électrique piloté, volontairement isolé du réseau électrique européen. Le système est composé de six machines synchrones chargées de la production d'énergie, chacune étant mécaniquement couplée à un moteur à courant continu. Ces moteurs DC simulent des turbines hydroélectriques de type Pelton, permettant une représentation réaliste des dynamiques de production. L'objectif principal est de synchroniser les six groupes de production afin de créer un réseau électrique isolé et contrôlable. Cette configuration permet l'observation et l'étude des échanges de puissance active et réactive au sein du système.

En plus des unités de production, plusieurs éléments de consommation sont intégrés au réseau : un moteur asynchrone, un ensemble de condensateurs et une charge résistive. Ces composants apportent des caractéristiques électriques variées, essentielles pour analyser le comportement du système dans différentes conditions de fonctionnement.

2 Réseau

2.1 Schéma général

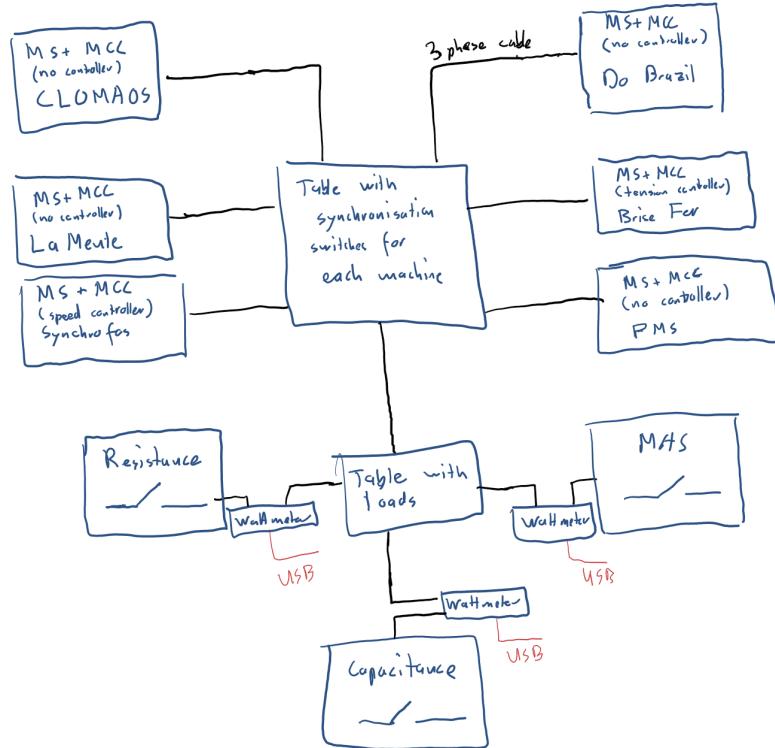


FIGURE 1 – Schéma général

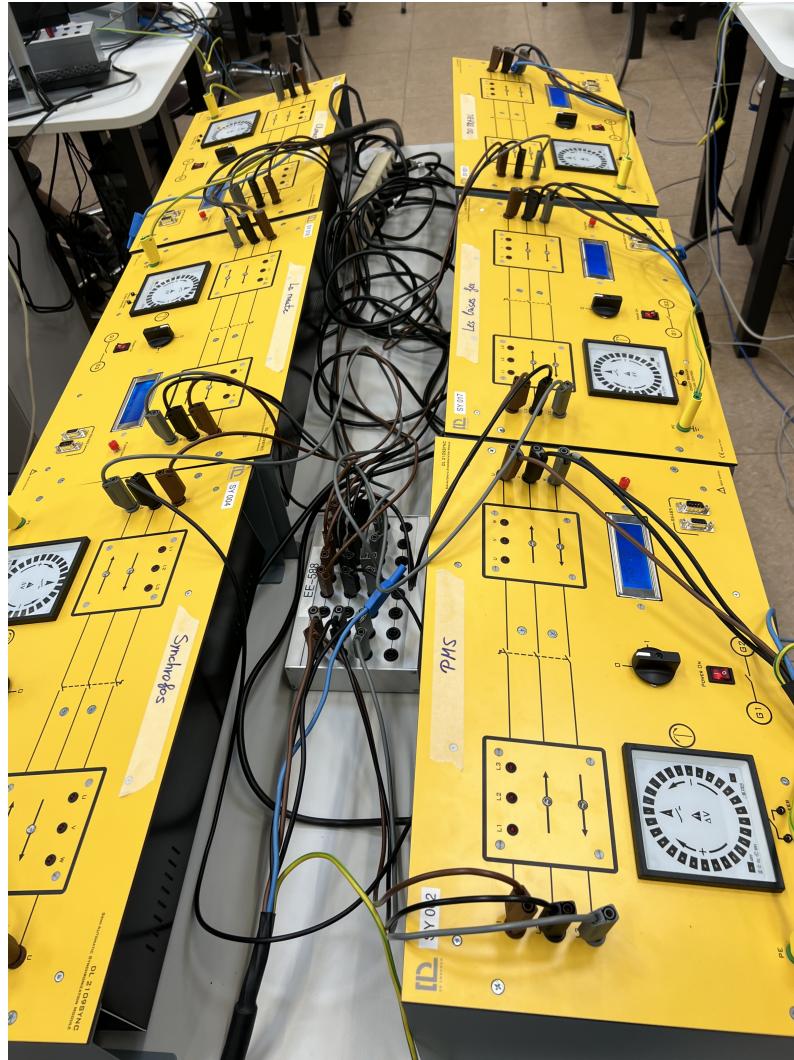


FIGURE 2 – Table de synchronisation des groupes

2.2 Différents composants

2.2.1 Machine à courant continu

La machine à courant continu (DC) simule une turbine hydroélectrique de type Pelton, ce qui permet une modélisation réaliste des dynamiques de production d'énergie. Chaque machine DC est couplée mécaniquement à une machine synchrone via un arbre commun. Le réseau comprend ainsi six ensembles de ce type, chacun contribuant à la génération d'énergie électrique lorsqu'ils sont en fonctionnement. L'entraînement des machines se fait en alimentant les machines DC avec un courant d'excitation de 0,45A.

Lors d'un premier test, tous les bancs étaient équipés d'un contrôleur de vitesse, comme décrit dans la section 3.2. Les machines DC fonctionnaient alors en mode courant. Dans ce mode, il est possible de faire varier le courant dans l'induit afin de modifier le couple exercé sur l'arbre. Cela permet de contrôler la puissance active générée ou absorbée par la machine, ce qui est essentiel pour équilibrer le réseau électrique.

Dans un second test, un seul banc a été conservé avec un contrôle de vitesse. Pour les autres

machines, le démarrage s'est d'abord effectué en mode tension, de façon à faire tourner l'arbre à la vitesse nominale de 1500 tours par minute. Une fois la synchronisation de la machine synchrone avec le réseau établie, la machine DC a ensuite été basculée en mode courant. Cette transition permet de reprendre le contrôle du couple et, par conséquent, de la puissance active. Le passage d'un mode à l'autre s'effectue à l'aide d'une clé spécifique, utilisée manuellement pour commuter entre les deux configurations.

Plusieurs précautions ont été prises pour garantir la sécurité des machines et éviter les dommages mécaniques. Il est crucial de ne pas allumer une machine DC en mode courant si la machine synchrone à laquelle elle est couplée n'est pas encore synchronisée au réseau. En effet, sans opposition mécanique, la machine s'emballe et cherche à accélérer indéfiniment, ce qui peut entraîner une casse mécanique. Un autre risque majeur concerne la transition entre les modes de fonctionnement : si l'on oublie de ramener la tension à zéro avant de repasser en mode courant, un couple excessif peut être appliqué instantanément sur l'arbre. Ce couple peut dépasser la limite nominale de 13,5 Nm, mettant en danger l'intégrité mécanique du système.

2.2.2 Machine synchrone

La machine synchrone joue le rôle de génératrice dans notre réseau électrique. Elle est responsable de fournir de l'énergie électrique au réseau. Son but est de maintenir une fréquence stable et d'imposer une tension constante au réseau. Afin de modéliser un réseau correspondant aux normes européennes, les valeurs de références sont respectivement 50 Hz et 220 V. La machine synchrone est entraînée par la machine à courant continu et fournit de la puissance active (P [W]) et réactive (Q [VAr]) au réseau et, donc, aux différentes charges connectées. Lorsque plusieurs machines synchrones sont interconnectées, des réglages manuels ajustent les injections de puissance de chaque groupe dans le réseau afin de tendre à un équilibre et d'éviter qu'une seule machine fournisse trop. La puissance active fournie est contrôlée grâce au torque de la machine à courant continu. Le contrôle de la puissance réactive se fait quant à lui à travers le courant d'excitation de la machine synchrone.

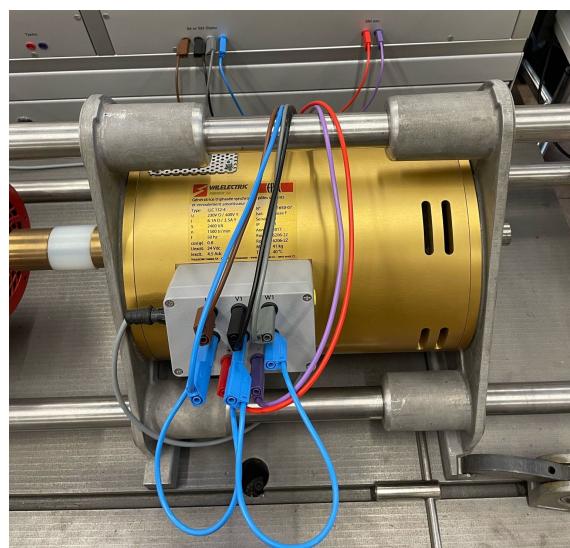


FIGURE 3 – Machine synchrone qui alimente le réseau

2.2.3 Résistance

Des résistances sont utilisées dans le réseau comme éléments de charge. Elles consomment uniquement de la puissance active. Ainsi, sur le topogramme, elles ne font bouger le point de fonctionnement de la machine synchrone que verticalement. La charge appliquée sur le réseau augmente quand on diminue la résistance.



FIGURE 4 – Résistance utilisée avec le wattmètre pour les mesures de puissance du réseau

2.2.4 Capacité

Les capacités génèrent de la puissance réactive quand elles sont en charge. Les connecter au réseau permet donc de compenser la consommation de puissance réactive d'autres charges. En effet, certains éléments consommateurs tels que les machines asynchrones absorbent de la puissance réactive. Les capacités soulagent donc les machines synchrones et améliorent la stabilité du réseau. La connexion de capacités déplace le point du topogramme vers la gauche et ce qu'horizontalement. La charge augmente quand on a une plus grande capacité.



FIGURE 5 – Capacités utilisées

2.2.5 Machine asynchrone

La machine asynchrone fait office de charge active et réactive. Dans notre réseau, elle absorbe à la fois une puissance active pour compenser les pertes mécaniques, et une puissance réactive pour l'établissement de son champ magnétique. Elle fait bouger le point du topogramme à la fois verticalement et horizontalement (mais ce uniquement vers la droite). La charge varie en fonction de la vitesse à laquelle tourne la machine.

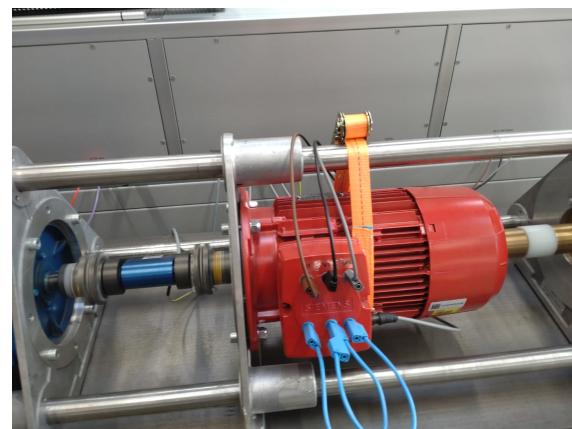


FIGURE 6 – Machine asynchrone en charge

3 Test de mise en réseau de machines

3.1 Réseaux de 2 machines chacune équipée de contrôles en vitesse et en tension

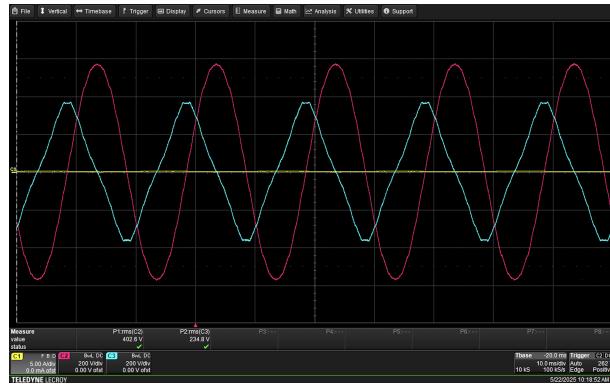


FIGURE 7 – Observations de la machine synchrone du groupe *La meute* avant la mise en réseau. U_{ligne} en rose, U_{phase} en bleu et I_{ligne} en jaune

Cette section illustre la connexion, ou mise en réseau, de deux machines synchrones. Les deux machines sont telles que décrites dans les sections précédentes, elles ont chacune leur propre contrôleurs en courant et en tension. Les mesures sont relevées uniquement sur une des deux machines, celle du groupe *La meute* (Fig. 1). Les mesures de courant et de tension à la sortie de la machine et avant la connexion au réseau sont présentées dans la figure 7. La figure 9 présente les mesures après la connexion des machines. On notera cependant un changement de graduation pour le courant entre ces figures : sur la figure 7, il est affiché à l'échelle de 5A/div tandis que sur la figure 9a l'échelle est de 10mA/div et de 200mA/div sur la figure 9b. La figure 9 présente des courbes instables et moins lisses que la la figure 7. Finalement, la figure 8 illustre l'instant de la connexion entre les deux machines. Un pic de courant très important (environ 4A) est observé pendant le transitoire. Ces courbes sont caractéristiques de la mise en réseau de deux machines contrôlées indépendamment : les deux contrôleurs tentent de compenser les changements imposés par 'autre contrôleur. Simplement dit, contrôleur n.2 voit un changement de tension imposé par contrôleur n.1 qui est inexplicable pour le contrôleur 2 (ce n'est pas lui qui l'a imposé) et il doit donc ralentir et compenser le changement. Le résultat est un système oscillant et instable.

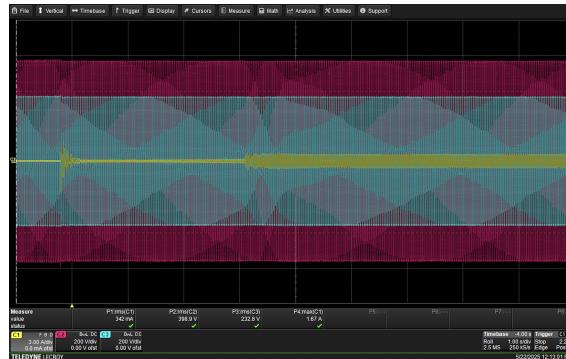


FIGURE 8 – Connexion de la meute à une autre machine synchrone, les deux machines sont équipées de contrôleurs. U_{ligne} en rose, U_{phase} en bleu et I_{ligne} en jaune

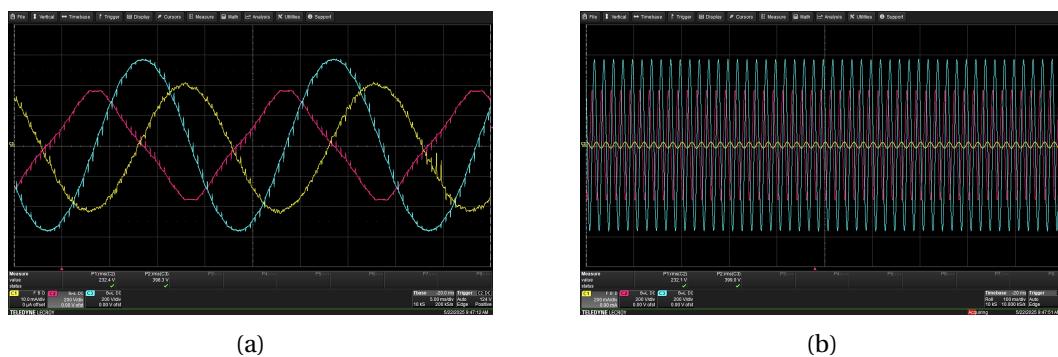


FIGURE 9 – Observations de la machine synchrone du groupe *La meute* mise en réseau avec une autre machine synchrone. U_{phase} en rose, U_{ligne} en bleu et I_{ligne} en jaune. Les deux sous-figures représentent la même situation mais à des échelles de temps différentes

3.2 Réseaux de six machines



(a) avec tous les contrôleurs. (U_{phase} en rose et (b) 2 contrôleurs pour l'ensemble du réseau. (U_{ligne} en rose, U_{phase} en bleu, I_{ligne} en jaune [5A/div])

FIGURE 10 – Mise en réseau de six machines synchrones.

Cette section présente la mise en réseau de l'intégralité de machines synchrones. Dans une premier temps, elles conservent toutes leurs contrôleurs en courant et en tension (fig. 10a). Dans cette figure, l'échelle du courant est la même que dans la figure 7, 5A/div. On assiste donc à des valeurs du courant supérieures à celles recommandées par la plaque signalétique. Cet effet découle de la compétition entre les contrôleurs. Le système est instable, chaque contrôleur

tente d'y remédier sans connaître les effet des autres contrôleurs, il y a beaucoup de couple. Le courant mesurée est donc très élevé. Dans une telle configuration, on ne peut garantir que le réseau supporte l'ajout d'une charge. Ainsi, dans la figure 10b, seul un contrôleur en courant et un contrôleur en tension sont conservés pour l'entier du réseau. L'amplitude du courant conserve certaines instabilités mais diminue d'un facteur 10.

4 Mise en réseau finale

4.1 Machine avec contrôle en vitesse

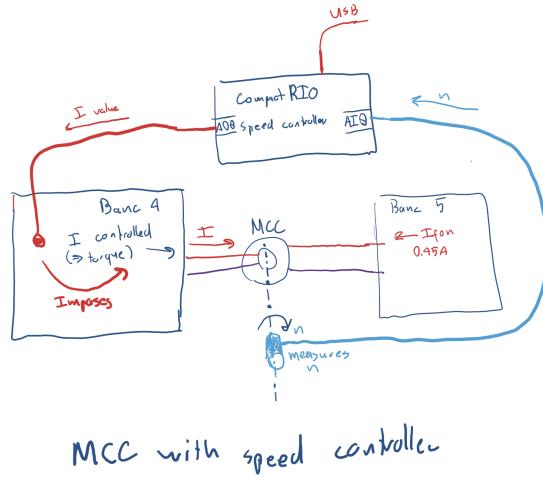


FIGURE 11 – Schéma de la machine à courant continu avec contrôle en vitesse

4.1.1 Rôle dans le réseau

Le contrôle de vitesse permet de maintenir la fréquence du réseau électrique à 50 Hz. Pour cela, un contrôleur est installé sur la machine DC du banc, agissant sur le courant d'armature. La machine DC simule une turbine Pelton qui transmet sa puissance à une génératrice synchrone. En modulant le courant, le contrôleur de vitesse reproduit le fonctionnement d'une centrale hydroélectrique ajustant le débit d'eau dans ses turbines afin de faire varier la puissance produite. Ce mécanisme permet ainsi d'équilibrer la puissance active dans le réseau ($P_{produite} = P_{consomée}$).

4.1.2 Connexion au réseau

La machine équipée de contrôle en vitesse doit faire partie des 2 premières machines mises en réseau car sans elle, aucun contrôle en vitesse est effectué.

Pour la mettre en réseau, les différentes étapes sont effectuées :

- Augmenter le courant d'excitation de la machine DC à la valeur nominale 0,45 A.
- Activer le contrôleur en vitesse pour agir sur le courant dans l'induit et fixer la rotation de l'arbre à 1500 rpm.
- Augmenter le courant d'excitation à la machine synchrone jusqu'à obtenir la tension désirée en sortie de la machine 400 V.
- Synchroniser

4.1.3 Ajout de charge au réseau

Lors de l'ajout d'une charge sur le réseau, le contrôle en vitesse va permettre de répondre à la différence de puissance active du réseau, car c'est la seule pouvant agir automatiquement (non-manuellement), toute en gardant sa vitesse nominale.

Résistance Dans le cas d'une résistance, toute la différence de puissance demandée va être assumée par la machine équipée du contrôle en vitesse car la charge est purement active.

La Figure 12 montre une mise en réseau d'une charge active, une résistance. Lors de cette mise en réseau, une demande immédiate de puissance active apparaît. Seule la machine équipée du régulateur de vitesse réagit dans un premier temps pour compenser cette demande. Une fois la charge stabilisée, les autres machines du réseau augmentent progressivement leur couple pour fournir davantage de puissance active. Cette redistribution de la charge permet à la machine régulée de retrouver sa capacité de réponse, en vue de gérer d'éventuelles variations futures de charge.

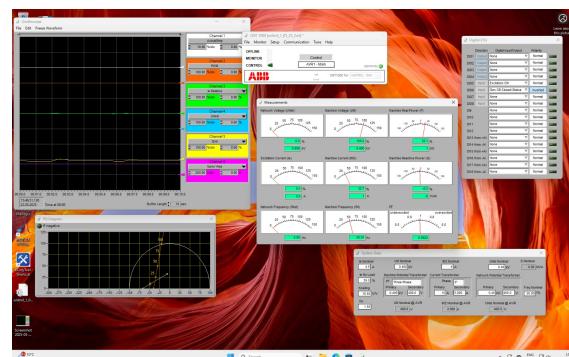
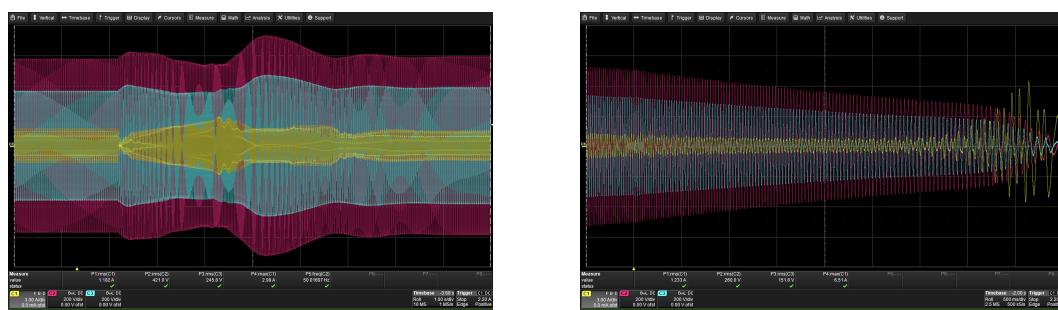


FIGURE 12 – Mise en réseau d'une résistance



(a) Jojo l'assistant diabolique qui joue avec les résis- (b) Grosse résistance activé, crash du réseau, syn-
tances chronisateur a cramé

FIGURE 13 – Observation du réseau - La meute

Capacité Dans le cas d'une capacité, toute la différence de puissance demandée ne va pas être assumée par la machine équipée du contrôle en vitesse car la charge est purement réactive. Cependant, pour répartir la charge réactive entre toutes les machines, il est possible de modifier le courant d'excitation de celle-ci sous demande des autres opérateurs du réseau.

MAS Dans le cas d'une machine asynchrone utilisée comme charge, celle-ci va être une charge active et réactive. Toute la différence de puissance demandée va être assumée par la machine équipée du contrôle en vitesse. La puissance active demandée P_{el} par la machine asynchrone dépend du torque imposé à cette machine en suivant la formule :

$$P_{el} = T_{em} \cdot \Omega + Pertes$$

Les Figures 14 et 15 montrent une mise en réseau d'une machine asynchrone utilisée comme charge. Le démarrage d'une MAS provoque une demande en courant très importante durant une courte durée. Il s'agit d'un chargement actif et réactif, les deux machines contrôlés en tensions et vitesses doivent donc être prêtes à absorber la charge. En raison du caractère soudain de cette demande, on observe sur la Figure 14 un ralentissement brutal de la fréquence du réseau, avant que le contrôleur ne parvienne à la ramener progressivement à 50 Hz. De même, la Figure 15 met en évidence d'importantes oscillations des puissances active (P) et réactive (Q) au moment du démarrage, avant que celles-ci ne se stabilisent autour de valeurs constantes.

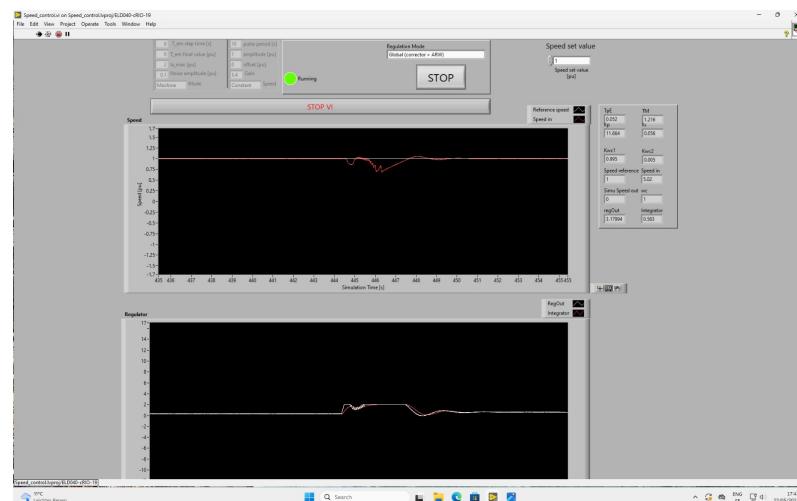


FIGURE 14 – Mise en réseau d'une machine asynchrone

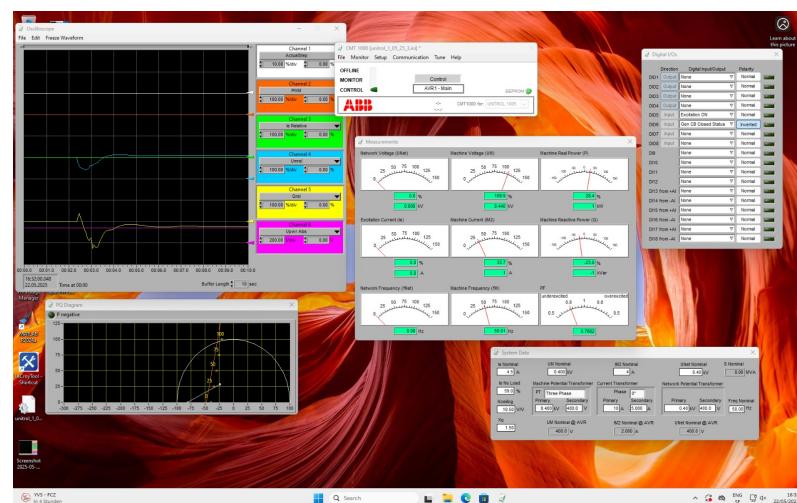
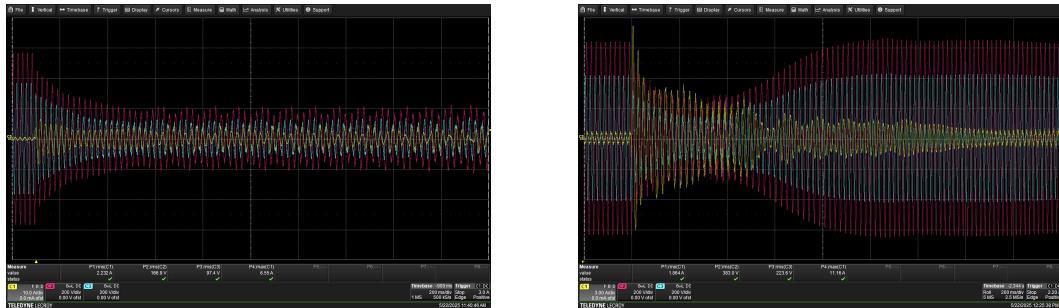


FIGURE 15 – Effet de la mise en réseau d'une machine asynchrone sur l'échange de puissance



(a) 1er démarrage de la MAS (début seulement)

(b) 2ème démarrage de la MAS

FIGURE 16 – Observation du réseau - La meute

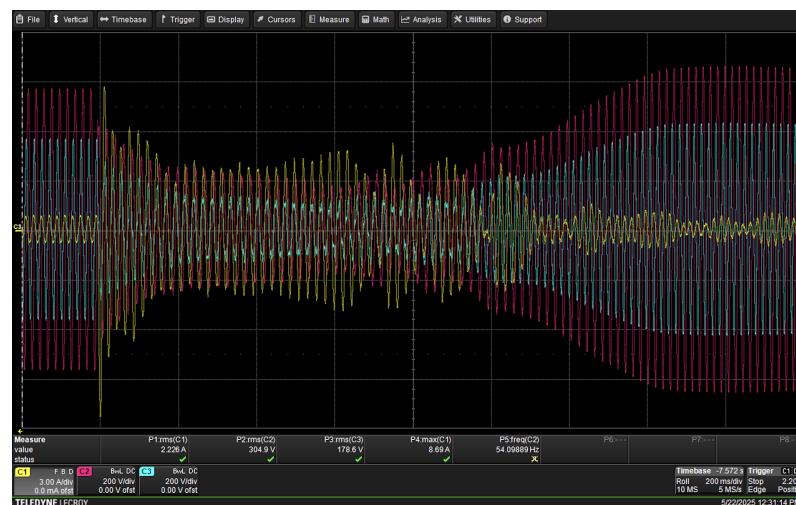
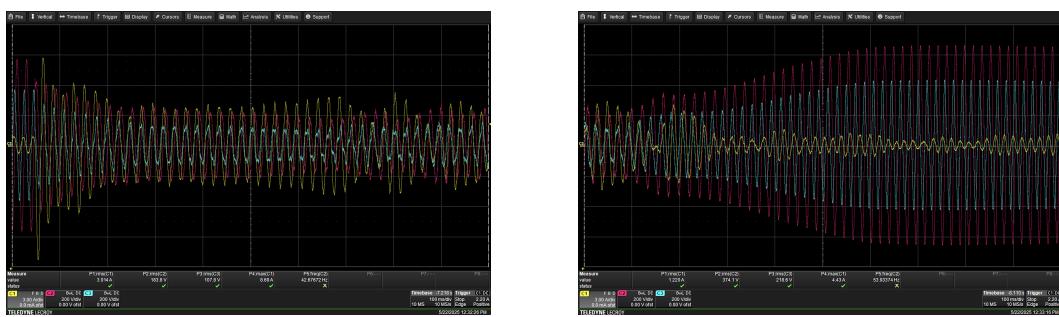


FIGURE 17 – 3ème démarrage de la MAS



(a) Zoom 3ème démarrage, 1

(b) Zoom 3ème démarrage, 2

FIGURE 18 – Observation du réseau - La meute

4.1.4 Répartition de la puissance active

Puisque la machine synchrone équipée du contrôle de vitesse compense toute variation de puissance active résultant des connexions ou déconnexions de charges sur le réseau, il est nécessaire de s'assurer qu'elle soit capable de les absorber.

Lorsqu'un important consommateur de puissance active est attendu sur le réseau, il est

logique de réduire au maximum la production de puissance active dans la machine avec le contrôle en vitesse, tout en demandant aux autres unités de production d'augmenter leur puissance pour compenser cette nouvelle demande. Toutefois, la simulation réalisée en classe ne reflète pas entièrement les conditions réelles, car une centrale hydroélectrique équipée d'une turbine Pelton ne peut pas basculer rapidement entre les modes de pompage et de turbinage, et donc passer instantanément du rôle de producteur à celui de consommateur de puissance active. Pour anticiper au mieux l'arrivée d'un grand consommateur tout en restant proche de la réalité, il convient donc de limiter autant que possible la puissance active produite, tout en maintenant la machine en mode générateur.

Lorsqu'un gros consommateur de puissance active s'apprête à se retirer du réseau, il est logique d'augmenter autant que possible la puissance active fournie par la machine équipée du régulateur de vitesse, en s'approchant de sa puissance maximale avant décrochage. Cela permet aux autres opérateurs de réduire leur production de puissance active et donc de transférer la charge vers cette machine qui va assumer à leur place cette demande.

Dans une situation incertaine où l'évolution de la charge n'est pas connue à l'avance, il est préférable de positionner la machine en mode production, à un niveau intermédiaire, autour de la moitié de sa puissance maximale avant décrochage.

4.2 Machine avec contrôle en tension

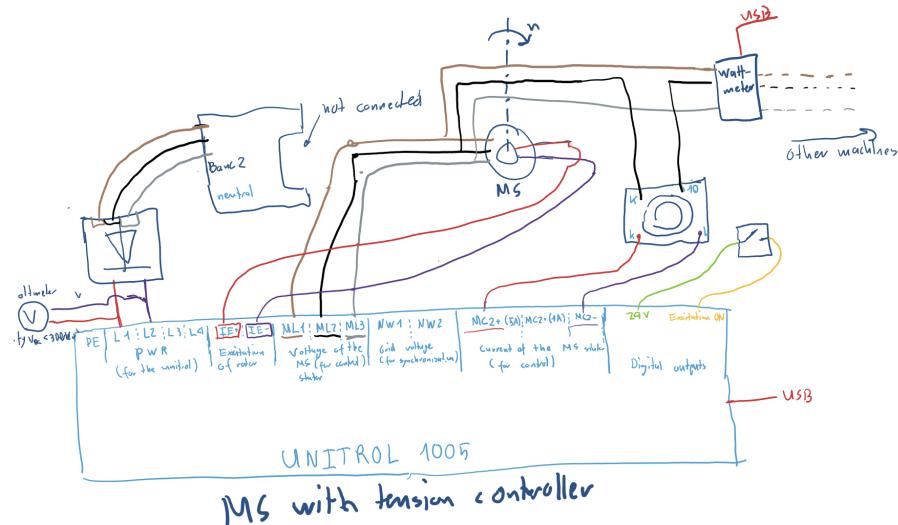


FIGURE 19 – Schéma de la machine synchrone avec contrôle en tension

4.2.1 Rôle dans le réseau

Le contrôle de la tension joue un rôle essentiel dans le maintien de la stabilité et de la qualité de l'énergie au sein d'un réseau électrique, en particulier dans les réseaux isolés ou pilotés. Il agit principalement sur la gestion de la **puissance réactive** (Q), car la tension aux bornes d'un nœud dépend fortement de l'équilibre entre la puissance réactive générée et celle consommée. Pour cela, plusieurs moyens sont utilisés mais principalement l'excitation des *génératrices synchrones* permet d'ajuster la tension de sortie et donc l'échange de puissance réactive avec le réseau. Ainsi, le contrôle de tension contribue à maintenir les tensions dans les plages acceptées.

tables, à éviter les effondrements de tension et à optimiser le fonctionnement global du système électrique. Avec le contrôle en tension, la machine tend à ajuster automatiquement le courant d'excitation de la machine synchrone afin de maintenir la tension à ses bornes. Cependant, cette régulation peut conduire, dans certaines conditions, à dépasser les limites nominales de la machine, notamment en termes de courant ou de puissance réactive. Pour éviter ce type de surcharge, d'autres machines synchrones sont intégrées dans le réseau, afin de répartir plus efficacement la production de puissance réactive entre plusieurs générateurs et ainsi garantir un fonctionnement sûr et stable du système.

4.2.2 Ajout de charge au réseau

Lors de l'ajout d'une charge sur le réseau, le contrôle en tension va permettre d'accepter la différence de puissance réactive du réseau, car c'est la seule pouvant agir automatiquement (non-manuellement), tout en gardant sa tension nominale.

Résistance Comme présenté dans la section du contrôle en vitesse, dans le cas d'une résistance, toute la différence de puissance demandée va être assumée par la machine équipée du contrôle en vitesse car la charge est purement active. Dans ce cas la machine équipée du contrôle en tension ne va pas réagir à l'introduction de la charge automatiquement. A noter, qu'il est possible de reprendre manuellement une partie de la charge.

Capacité L'ajout d'un condensateur dans un réseau électrique fournit de la puissance réactive capacitive ($Q > 0$), ce qui contribue à maintenir ou à augmenter la tension locale. Pour une génératrice synchrone en contrôle de tension, cela signifie que le système de régulation réduit automatiquement le courant d'excitation, car une partie de la demande en puissance réactive est compensée localement par le condensateur. Ainsi, la machine est soulagée dans la production de réactive. Toutefois, si la capacité est excessive, cela peut provoquer une surtension, que la génératrice ne pourra pas compenser au-delà de ses limites d'excitation minimale, ce qui peut compromettre la stabilité du réseau.

MAS Une machine asynchrone, comme un moteur asynchrone, requiert un courant de magnétisation pour établir le champ magnétique nécessaire à son fonctionnement. Contrairement aux machines synchrones, elle ne possède pas de système d'excitation autonome et doit donc absorber de la **puissance réactive** ($Q < 0$) directement du réseau. Cette consommation de réactive peut entraîner une chute de tension, en particulier dans les réseaux isolés ou faiblement interconnectés. Pour limiter cet effet, il est courant d'associer un **condensateur de compensation**, branché au moment de la connexion de la machine au réseau, afin de fournir localement la puissance réactive requise et ainsi stabiliser la tension.

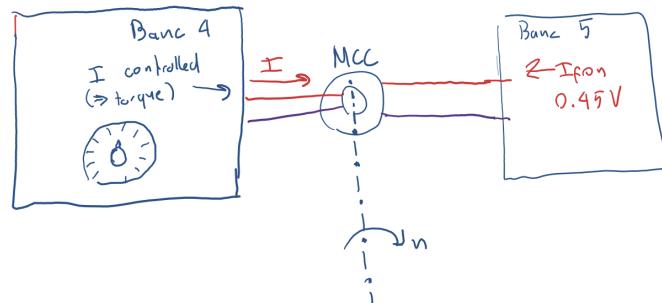
4.2.3 Répartition de la puissance réactive

De manière similaire au contrôle en vitesse, puisque la machine synchrone équipée d'un régulateur en tension compense automatiquement toute variation de puissance réactive liée aux connexions ou déconnexions de charges, il est essentiel de s'assurer qu'elle dispose de la capacité suffisante pour absorber ou fournir cette puissance sans dépasser ses limites d'exploitation.

Lorsqu'un consommateur important de puissance réactive est sur le point d'être connecté au réseau, il est judicieux de minimiser la production de puissance réactive de la machine en contrôle de tension, tout en sollicitant les autres unités de production pour qu'elles augmentent temporairement leur injection de réactive afin de répondre à cette nouvelle demande.

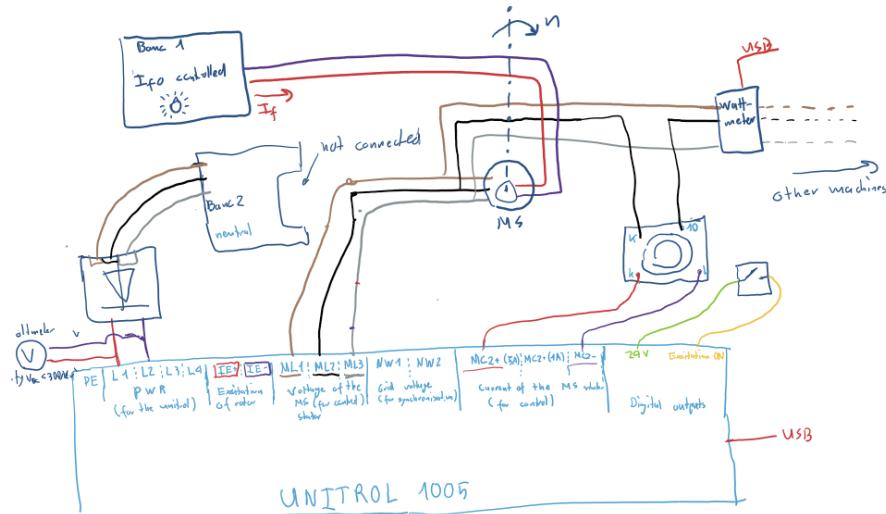
Inversement, lorsqu'un grand consommateur de puissance réactive s'apprête à se déconnecter, il est stratégique d'augmenter autant que possible la puissance réactive fournie par la machine dotée du contrôle de tension, en l'amenant près de sa capacité maximale avant décrochage. Cela permet aux autres unités de réduire leur production de réactive, transférant ainsi progressivement la charge vers la machine régulée, qui assurera la continuité de l'équilibre réactif du réseau.

4.3 Machines avec contrôle manuel



MCC without speed controller
(controlled manually)

(a) Schéma de la machine à courant continu avec contrôle manuel



MS without tension controller
(controlled manually)

(b) Schéma de la machine synchrone avec contrôle manuel

FIGURE 20 – Schémas des machines avec contrôle manuel

4.3.1 Motivation pour l'utilisation de machines non contrôlées

Toutes les machines synchrones qui ne sont si celle du contrôle en tension ni celle du contrôle en vitesse sont contrôlées manuellement. La raison derrière cette utilisation de certaines machines en contrôle manuel et non en contrôle en tension ou en vitesse est l'instabilité illustrée dans la section 3. Dans celle-ci, la compétitivité des contrôleurs menant à un système instable avait été observée. Dans le cas présent de mise en réseau de plusieurs machines puis d'application de sauts de charge, de telles instabilités peuvent provoquer un effondrement du système.

Une solution simple est de n'utiliser qu'un contrôleur de tension (qui impose la tension

du système) et qu'un contrôleur de vitesse (qui impose la vitesse/déphasage du système) pour l'entier du système. Toutes autres machines sont sous contrôle manuel.

4.3.2 Rôle dans le réseau

Le rôle des machines non contrôlées est de fournir de la puissance active ou réactive au système. Ceci se fait par le contrôle manuel du courant d'excitation de la machine synchrone et le contrôle manuel du torque (donc courant du rotor) de la machine à courant continue. Le changement du torque va principalement induire un changement de la puissance active et le changement du courant d'excitation de la MS va induire un changement de la puissance réactive. Le but des contrôles manuels des puissances est la compensation complète des charges imposées par la résistance, la capacitance et la machine asynchrone ainsi que des pertes du système. Ce contrôle manuel a pour objectif de permettre aux machines avec contrôleur, et donc chargées de l'équilibre des puissances et de la stabilité du systèmes, d'être neutres en terme de production des puissances et maximiser leur flexibilité disponible pour le contrôle.

4.3.3 Connexion au réseau

Les machines sans contrôleurs sont gérées manuellement pour les synchroniser au réseau. Pour ça, les étapes suivantes sont effectuées :

- Augmenter le courant d'excitation de la MCC à la valeur nominale $0,45A$.
- Manuellement augmenter la tension de la MCC (en mode qui contrôle la tension) pour atteindre une vitesse de rotation de $1500 rpm$.
- Augmenter le courant d'excitation à la MS jusqu'à obtenir la tension désirée en sortie de la machine $400V$.
- Synchroniser
- Changer le contrôle de tension de la MCC au mode du contrôle de courant pour gérer le couple transmis par la MCC.

4.4 Résultat de la mise en réseau et mesure

Dans cette section est présenté les résultats. Dans chacun des graphique la puissance active et réactive de chaque élément du réseau est présentée, ainsi que leur total. Pour les deux puissances leur total est proche de zéro.

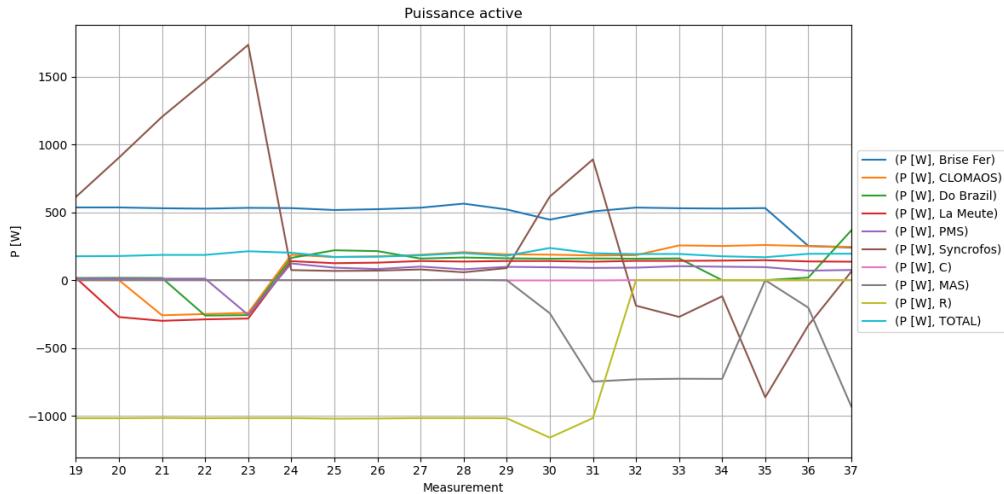


FIGURE 21 – Répartition de la puissance active dans le réseau isolé; données : Tab. 1

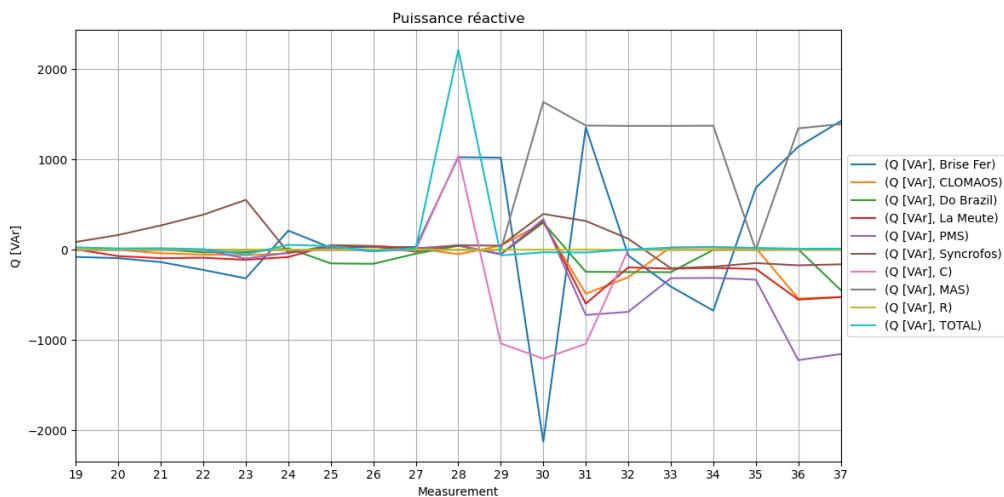


FIGURE 22 – Répartition de la puissance réactive dans le réseau isolé; données : Tab. 2

Analyse et explication de certaines mesures :

- Mesure 19, Brise Fer et Syncrofos sont synchronisé avec leurs contrôleurs de vitesse et tension respectivement. Une résistance active est aussi branché au réseau.
- Mesure 20-23, les quatre machines sans contrôleurs sont raccordées au réseau.
- Mesure 24, la puissance active est redistribuée entre les générateurs afin de décharger Syncrofos.
- Mesure 25, un ajustement de la puissance réactive pour toutes les machines est effectué pour équilibrer les tensions.
- Mesure 28, la puissance réactive totale (Q) dépasse 2000 Var, ce qui est anormal; en effet, la capacité était mal câblée.
- Mesure 30, la machine asynchrone est connectée, suivie d'une synchronisation réussie dès la première tentative. On remarque que brise fer est en négatif, c'est la machine ayant le réglage de tension, elle a encaisser l'apport positif de la machine asynchrone.

4.4.1 Discussion et amélioration des mesures

Pour l'année prochaine, il serait intéressant de comparer les mesures et les ajustements manuels effectués sur les unités de production, qui ne disposent d'aucun réglage, avec les résultats d'un OPF (Optimal Power Flow). Cette approche permettrait de comparer la situation observée durant la séance à une configuration optimisée du réseau électrique. Pour cela, il serait nécessaire de collecter davantage de données, notamment sur le courant et la tension de chaque unité de production.

5 Conclusion

Quelques conclusions générales peuvent être tirées de cette séance en laboratoire :

- Si plusieurs contrôleurs d'un même type (tension ou vitesse) sont actifs, ils s'affrontent, ce qui peut entraîner une défaillance du système.
- Les machines sans contrôleur doivent prendre en charge les demandes de puissance active et réactive initialement prises en charge par les machines contrôlées avec contrôleurs.
- Dans un système avec un seul régulateur de vitesse, le régulateur de vitesse
 - réagira à une résistance supplémentaire, ce qui est logique puisqu'il s'agit d'une modification de la puissance active et donc du couple qui est réglé par la vitesse.
 - ne réagira pas à une capacité supplémentaire, car un changement de puissance réactive affecte davantage la tension.
 - réagira à une machine asynchrone en raison des oscillations au démarrage et de la consommation ultérieure de puissance active.
- Dans un système avec un seul contrôleur de tension, le contrôleur de tension
 - ne réagira pas à une résistance supplémentaire, car la résistance ne consomme que de la puissance active
 - réagira à une capacité supplémentaire, car elle induit une demande de puissance réactive qui est fortement liée au courant d'excitation de la machine synchrone et donc au contrôleur de tension
 - réagira à une machine asynchrone, car elle consomme de la puissance active et réactive. Cet effet peut conduire à une défaillance du système s'il y a déjà une forte demande de puissance réactive sur cette machine.

6 Annexe

6.1 Mesures des puissances

```
1 #!/usr/bin/env python
2 # coding: utf-8
3
4 # In [83]:
5
6
7 import pandas as pd
8 file_path = "exported_measurements.csv"
9 data = pd.read_csv(file_path)
10 data.head(10)
11
12
13 # In [84]:
14
15
16 data['Device\u201dName'] = data['Device\u201dName'].str.split('-\u201d').str[0]
17 data.head(10)
18
19
20 # In [85]:
21
22
23 data = data[(data['Measurement'] >= 19) & (data['Measurement'] <=
24     37)] #mesure d'int r t pendant la sc ance
25 data.head(15)
26
27
28 # In [86]:
29
30
31 # Mise en forme du dataframe
32 pivoted_table = data.pivot_table(index='Measurement', columns='
33     Device\u201dName', values=['P\u201d[W]', 'Q\u201d[VAr]'], aggfunc='mean')
34 pivoted_table = pivoted_table.reset_index()
35
36
37 # Display the pivoted table
38 pivoted_table
39
40
41 # 2 tableaux : P et Q
42 p_w_table = pivoted_table[['Measurement', 'P\u201d[W]']]
43 q_var_table = pivoted_table[['Measurement', 'Q\u201d[VAr]']]
44
```

```

45 # Display the separated tables
46 p_w_table.head()
47 #q_var_table.head()
48
49
50 # In [88]:
51
52
53 # R arangement des colonnes
54 q_var_columns = [col for col in q_var_table.columns if col[1] not
55     in ['C', 'R', 'MAS', 'TOTAL']] + \
56         [col for col in q_var_table.columns if col[1] in [
57             'C', 'R', 'MAS', 'TOTAL']]
58 q_var_table = q_var_table[q_var_columns]
59
60 # Reorder columns for p_w_table
61 p_w_columns = [col for col in p_w_table.columns if col[1] not in [
62     'C', 'R', 'MAS', 'TOTAL']] + \
63         [col for col in p_w_table.columns if col[1] in ['C',
64             'R', 'MAS', 'TOTAL']]
65 p_w_table = p_w_table[p_w_columns]
66
67 # Display the updated tables
68 q_var_table.head()
69 p_w_table.head()
70
71
72 # Plot P
73 import matplotlib.pyplot as plt
74
75 fig1, ax1 = plt.subplots(figsize=(12, 6))
76 p_w_table.plot(x=('Measurement', ''), kind='line', ax=ax1, title='
77     Puissance active')
78 ax1.set_xlabel('Measurement')
79 ax1.set_ylabel('P [W]')
80 ax1.legend(loc='center left', bbox_to_anchor=(1.0, 0.5))
81 plt.tight_layout()
82 ax1.set_xlim(left=19, right=37)
83 ax1.set_xticks(range(19, 38))
84 ax1.grid(True)
85 plt.savefig('P.png')
86 plt.show()
87
88 # Plot Q
89 fig2, ax2 = plt.subplots(figsize=(12, 6))

```

```
90 q_var_table.plot(x=('Measurement', ''), kind='line', ax=ax2, title=
91     'Puissance r active')
92 ax2.set_xlabel('Measurement')
93 ax2.set_ylabel('Q[VAr]')
94 ax2.legend(loc='center left', bbox_to_anchor=(1.0, 0.5))
95 ax2.set_xlim(right=37)
96 ax2.set_xlim(left=19, right=37)
97 ax2.set_xticks(range(19, 38))
98 ax2.grid(True)
99 plt.tight_layout()
100 plt.savefig('Q.png')
101 plt.show()
102
103
104 # In [90]:
105
106
107 # Sauvegarde des tableaux en CSV
108 p_w_table.to_csv("p_w_table.csv", index=False)
109 print("p_w_table exported to p_w_table.csv")
110
111 q_var_table.to_csv("q_var_table.csv", index=False)
112 print("q_var_table exported to q_var_table.csv")
```

Listing 1 – Code python: visualisation des données

TABLE 1 – Mesure de la puissance active

Measurement	P [W]	P [W]	P [W]	P [W]	P [W]	P [W]	P [W]	P [W]	P [W]	P [W]	TOTAL
	Brise Fer	CLOMAOS	Do Brazil	La Meute	PMS	Syncrofoss	C	MAS	R		
19	536.0	0.0	16.0	17.0	12.0	613.0	0.0	0.0	-1018.0	176.0	
20	536.0	0.0	17.0	-272.0	12.0	903.0	0.0	0.0	-1018.0	178.0	
21	530.0	-259.0	16.0	-300.0	11.0	1204.0	0.0	0.0	-1016.0	186.0	
22	527.0	-250.0	-261.0	-289.0	11.0	1466.0	0.0	0.0	-1018.0	186.0	
23	533.0	-241.0	-258.0	-283.0	-256.0	1735.0	0.0	0.0	-1017.0	213.0	
24	531.0	187.0	164.0	140.0	123.0	74.0	0.0	0.0	-1017.0	202.0	
25	517.0	170.0	220.0	125.0	92.0	68.0	0.0	0.0	-1021.0	171.0	
26	523.0	175.0	214.0	129.0	82.0	70.0	0.0	0.0	-1020.0	173.0	
27	534.0	187.0	159.0	141.0	100.0	79.0	0.0	0.0	-1017.0	183.0	
28	564.0	206.0	167.0	137.0	80.0	58.0	4.0	0.0	-1017.0	199.0	
29	521.0	190.0	161.0	141.0	98.0	89.0	-2.0	0.0	-1018.0	180.0	
30	446.0	188.0	158.0	141.0	95.0	616.0	-2.0	-244.0	-1161.0	237.0	
31	507.0	182.0	160.0	136.0	90.0	890.0	-2.0	-748.0	-1017.0	198.0	
32	535.0	184.0	158.0	142.0	92.0	-188.0	0.0	-731.0	0.0	192.0	
33	530.0	256.0	160.0	142.0	103.0	-271.0	0.0	-727.0	0.0	193.0	
34	528.0	252.0	0.0	144.0	99.0	-119.0	0.0	-728.0	0.0	176.0	
35	531.0	259.0	0.0	147.0	96.0	-864.0	0.0	0.0	0.0	169.0	
36	252.0	251.0	19.0	138.0	70.0	-333.0	0.0	-203.0	0.0	194.0	
37	240.0	245.0	368.0	136.0	75.0	64.0	0.0	-933.0	0.0	195.0	

TABLE 2 – Mesure de la puissance active

Measurement	Q [Var]	Q [Var]	Q [Var]	Q [Var]	Q [Var]	Q [Var]	Q [Var]	Q [Var]	Q [Var]	Q [Var]	Q [Var]	R	TOTAL
	Brise Fer	CLOMAOS	Do Brazil	La Meute	PMS	Syncrofoss	C	MAS					
19	-78.0	0.0	6.0	6.0	3.0	88.0	0.0	0.0	3.0	28.0			
20	-92.0	0.0	6.0	-69.0	3.0	165.0	0.0	0.0	3.0	16.0			
21	-135.0	-37.0	5.0	-92.0	3.0	271.0	0.0	0.0	3.0	18.0			
22	-222.0	-52.0	-27.0	-87.0	3.0	390.0	0.0	0.0	3.0	8.0			
23	-315.0	-59.0	-27.0	-110.0	-97.0	554.0	0.0	0.0	3.0	-51.0			
24	213.0	-38.0	18.0	-79.0	-31.0	-30.0	0.0	0.0	3.0	56.0			
25	24.0	47.0	-150.0	52.0	21.0	45.0	0.0	0.0	3.0	42.0			
26	31.0	43.0	-154.0	42.0	-17.0	38.0	0.0	0.0	3.0	-14.0			
27	32.0	17.0	-42.0	17.0	12.0	-20.0	0.0	0.0	3.0	19.0			
28	1026.0	-48.0	46.0	49.0	50.0	51.0	1040.0	0.0	3.0	2217.0			
29	1021.0	48.0	-48.0	-48.0	-47.0	47.0	-1036.0	0.0	2.0	-61.0			
30	-2125.0	300.0	301.0	324.0	340.0	398.0	-1205.0	1638.0	2.0	-27.0			
31	1357.0	-486.0	-243.0	-596.0	-721.0	320.0	-1040.0	1377.0	3.0	-29.0			
32	-63.0	-303.0	-245.0	-194.0	-686.0	123.0	0.0	1373.0	0.0	5.0			
33	-406.0	29.0	-247.0	-208.0	-314.0	-203.0	0.0	1373.0	0.0	24.0			
34	-673.0	27.0	0.0	-200.0	-310.0	-186.0	0.0	1375.0	0.0	33.0			
35	687.0	21.0	0.0	-210.0	-330.0	-146.0	0.0	0.0	0.0	22.0			
36	1142.0	-538.0	6.0	-551.0	-1221.0	-171.0	0.0	1346.0	0.0	13.0			
37	1426.0	-524.0	-445.0	-522.0	-1154.0	-160.0	0.0	1393.0	0.0	14.0			