



Programme général des essais de validation des centrales éoliennes raccordées au réseau de transport d'Hydro-Québec

Avril 2026

Table des matières

1	Modalités des essais de validation	2
1.1	But des essais	2
1.2	Exigences préalables à la réalisation des essais	2
1.3	Modules des essais de validation	3
1.4	Exigences des essais	3
1.5	Période des essais	3
1.6	Rôle du <i>producteur</i> et d'Hydro-Québec	4
1.7	Certification	5
1.8	Système de surveillance	5
1.9	Instrumentation de mesurage	5
1.10	Vérifications périodiques	6
2	Description des essais de validation	7
2.1	Module A – Régulation réactive primaire	7
2.2	Module B – Comportement lors de sous-tension (<i>Low Voltage Ride Through</i>)	9
2.3	Module C – Comportement en fréquence et réponse inertielle	10
2.4	Module D – Régulation de tension secondaire	12
2.5	Module E – Facteur de puissance	16
2.6	Module F – Taux de rampe	18
2.7	Module G – Mesure en continu de la qualité de l'onde	20
2.8	Module H – Mise sous tension des transformateurs élévateurs au poste de départ	23
2.9	Module I – Caractérisation de l'impédance fréquentielle	25
2.10	Module J – Signaux externes	27
2.11	Module K – Comportement lors d'un flitage	29
3	Liste des documents de référence	31

PRÉAMBULE

Le document des « Exigences techniques de raccordement de centrales au réseau de transport d'Hydro-Québec » (15 juillet 2022) [1] contient une section dédiée aux exigences spécifiques aux centrales utilisant des SERMO. Afin de démontrer que ces exigences sont respectées, le propriétaire d'une centrale éolienne doit réaliser, à ses installations, des essais dits de validation. Ces essais permettent d'attester que les fonctionnalités principales du parc éolien sont opérationnelles, mais ne représentent pas l'ensemble des essais à effectuer. Trois documents complémentaires émis par Hydro-Québec encadrent le contenu de l'ensemble des essais requis :

- Le programme général des essais de validation (le présent document) qui est commun à toutes les centrales éoliennes. Il décrit les essais de validation à réaliser aux centrales éoliennes sans tenir compte des spécificités des installations. Ce document est disponible sur le site internet d'Hydro-Québec.
- Le programme général des essais de validation des centrales éoliennes raccordées au réseau de transport d'Hydro-Québec Module B – Essais types servant à décrire les essais en lien avec le module B du présent document. Ce document est aussi disponible sur le site internet d'Hydro-Québec.
- La procédure détaillée des essais de validation qui est particulière à chaque centrale éolienne et qui contient la séquence complète et spécifique des essais de validation pour cette centrale. Cette procédure tient compte notamment du type de technologie éolienne utilisée, de la configuration du réseau où est raccordé le parc éolien et des exigences particulières en vigueur à cette centrale. Pour les besoins du réseau local, de la technologie déployée et des réglages implantés, Hydro-Québec pourrait modifier le programme général d'essais et y inclure des essais complémentaires. Elle est généralement remise au *producteur* au moins deux semaines avant la date prévue pour réaliser les essais de validation.

La première section du présent document décrit les modalités des essais de validation. À la deuxième section, on retrouve la description des essais de validation lesquels sont séparés en onze modules.

Il est fortement suggéré au *producteur* de profiter de l'occasion des essais afin d'effectuer tous les travaux en lien avec les normes NERC si celui-ci est assujéti. De cette façon, les essais pourront aussi servir à des fins de fiabilité de son côté. À la fin de ce processus, les modèles de simulation PSSE et EMTP reproduisant le comportement de l'installation mesuré lors des essais doivent être fournis à Hydro-Québec.

DÉFINITIONS

Les mots ou expressions en caractères italiques dans le texte sont définis ci-après.

centre de téléconduite

Centre d'exploitation régional d'Hydro-Québec.

étude d'émission

Rapport d'étude fourni par le *producteur*, visant à démontrer le respect des « Limites d'émission des perturbations dans le réseau de transport d'Hydro-Québec » [2] ainsi que des exigences techniques complémentaires relatives à la qualité de l'onde.

Low Voltage Ride Through

Capacité des éoliennes à demeurer en service lors d'une baisse de tension.

producteur

Responsable du site de production éolienne

tension terminale

Tension de raccordement de l'éolienne au réseau collecteur, c'est-à-dire aux bornes moyenne tension du transformateur élévateur de l'éolienne (typiquement, à un niveau de tension de 34,5 kV et dénommé la moyenne tension).

1 Modalités des essais de validation

1.1 But des essais

Les essais exigés par Hydro-Québec poursuivent deux buts :

1. démontrer que la centrale éolienne répond aux exigences techniques d'Hydro-Québec;
2. permettre la validation de certains comportements et paramètres des modèles numériques et de la centrale, notamment ceux fournis par le *producteur* à Hydro-Québec. À cette fin, la réponse des modèles sera comparée aux enregistrements pris lors des essais.

Les essais du présent document ne s'appliquent pas aux technologies dites « grid forming ». Les essais de validation de ces technologies feront l'objet d'une procédure particulière adaptée au projet.

Advenant la situation où un parc éolien possède un système de stockage ou autre combinaison de technologies, des essais supplémentaires à ceux mentionnés dans le présent document sont requis. Ceux-ci seront précisés dans la procédure détaillée des essais de validation.

La réussite des essais de validation constitue un des éléments requis pour l'acceptation finale du raccordement par Hydro-Québec.

1.2 Exigences préalables à la réalisation des essais

Avant de procéder aux essais de validation du parc éolien, plusieurs livrables au projet doivent être fournis. Les livrables sont les suivants :

- Les réglages du parc éolien fournis par Hydro-Québec doivent être implantés.
- L'étude d'flotage du parc éolien réalisée par le producteur à l'aide d'un logiciel EMT démontre un comportement satisfaisant permettant la réalisation sécuritaire des essais.
- Les modèles de simulation dynamique et EMT requis par Hydro-Québec sont mis à jour et acceptés par Hydro-Québec pour représenter l'installation du *producteur*. Les modèles doivent inclure les réglages fournis par Hydro-Québec.
- Tous les équipements du parc éolien doivent être en service. En cas d'une mise en service en plusieurs étapes, les essais de validation doivent être réalisés pour chacune d'elles.
- Un registre des paramètres des systèmes des éoliennes, de tout contrôleur et de tout équipement auxiliaire doit être fourni. Ces équipements auxiliaires incluent, mais ne se limitent pas aux STATCOMS, changeurs de prise des transformateurs et bancs de condensateurs. Une documentation avec explication des paramètres sous format d'ordinogramme et une description textuelle et visuelle sous forme de schéma bloc des paramètres doivent être fournies conjointement au registre des paramètres.
- Les signaux requis détaillés dans chacun des modules doivent être disponibles à la sous-station principale du parc éolien (point de raccordement haute tension) pour permettre leur enregistrement à partir des équipements installés par Hydro-Québec.

- Les systèmes d'enregistrements de perturbation doivent être fonctionnels et l'information doit être acheminée sur les systèmes d'Hydro-Québec.

1.3 Modules des essais de validation

Les essais de validation sont séparés en onze modules qui visent à vérifier :

- **Module A – Régulation réactive primaire**
- **Module B – Comportement lors de sous-tension (*Low Voltage Ride Through*)**
- **Module C – Comportement en fréquence et réponse inertielle**
- **Module D – Régulation de tension secondaire**
- **Module E – Facteur de puissance**
- **Module F – Taux de rampe**
- **Module G – Mesure en continu de la qualité de l'onde**
- **Module H – Mise sous tension des transformateurs élévateurs au poste de départ**
- **Module I – Caractérisation de l'impédance fréquentielle**
- **Module J – Signaux externes**
- **Module K – Comportement lors d'un îlotage**

1.4 Exigences des essais

Les résultats de ces essais doivent montrer que la centrale éolienne répond aux spécifications des « Exigences techniques de raccordement de centrales au réseau de transport d'Hydro-Québec » [1] ainsi qu'aux exigences techniques complémentaires émises spécifiquement pour la centrale éolienne à l'étude.

1.5 Période des essais

Les essais de validation doivent être faits au plus tard six mois après qu'Hydro-Québec a accepté la mise en service commerciale de chaque étape de la centrale.

Les essais du module A sont réalisés sur une seule éolienne et peuvent donc être faits avant que toutes les éoliennes ne soient en service. Le module B fait l'objet de son propre document, comme mentionné à la section 2.2. Il est fortement recommandé de discuter avec le turbinier et Hydro-Québec pour planifier ces essais le plus tôt possible, étant donné leur complexité, le matériel requis et la logistique impliquée.

Le module H et la première série d'essais du module K sont également réalisés avant la mise en service de l'ensemble des éoliennes, dès que leurs conditions sont remplies.

Les essais des modules C, D, E, F, I et J, ainsi que la deuxième série d'essais du module K, sont faits sur l'ensemble de la centrale et doivent être réalisés de préférence une fois que toutes les éoliennes sont en

service et sans restriction de production. Une exception existe pour le module C : si les systèmes du *producteur* ne permettent pas l'essai sur l'ensemble du parc, il sera fait sur une seule éolienne.

Si le contrôleur de tension ou tout autre appareil (p. ex., compensateur synchrone, shunt ou statique) présent dans le parc éolien peut affecter le comportement de celui-ci dans les essais, il doit être en service à moins qu'il ne soit indiqué le contraire dans la procédure d'essais détaillée. À noter que si le parc éolien possède plusieurs étapes de mise en service, les essais de validation doivent être répétés pour chacune d'elles.

Le module G prévoit la validation du respect d'exigences liées à la qualité de l'onde pendant l'exploitation de la centrale au moyen d'un système de surveillance (voir section 1.8). Il est recommandé d'installer ce système avant le raccordement afin de mesurer la tension au point de raccordement, fournie par le réseau de transport. Cette mesure vise notamment à évaluer les harmoniques de tension préexistants (voir section 2.7.2.2).

Tous les essais doivent être coordonnés avec Hydro-Québec dans les semaines et les jours précédant les essais, et avec le répartiteur du *centre de téléconduite* concerné le jour des essais.

Il est fortement recommandé que le producteur réalise, durant la période des essais de validation, ses activités réglementaires nécessaires à la mise à jour, à la vérification et à la validation des modèles de son parc éolien dans les outils de simulation.

1.6 Rôle du *producteur* et d'Hydro-Québec

Le *producteur* a l'obligation de réaliser des essais de validation afin de démontrer que ses installations satisfont aux exigences d'Hydro-Québec. Il doit, au moins trois mois à l'avance, informer Hydro-Québec de la fenêtre de temps où il prévoit faire les essais. Le *producteur* doit par la suite, et ce dans les meilleurs délais, aviser Hydro-Québec de tout déplacement de cette fenêtre de temps.

Hydro-Québec fournit au *producteur*, au moins deux semaines avant la date prévue pour les essais, une procédure détaillée des essais de validation.

Le *producteur* doit permettre à Hydro-Québec de mettre en place dans les installations du *producteur* l'instrumentation pour effectuer les essais et analyser les résultats tels que l'installation d'un système de surveillance au point de raccordement ou à la barre haute tension du poste de départ, à une artère, ainsi qu'à une unité de production. Le système de surveillance peut enregistrer des signaux de façon continue ou sur détection de dépassement de seuils associés à des perturbations. Ces signaux sont principalement des tensions et courants électriques, mais peuvent aussi être des variables mécaniques ou d'autres signaux. Le *producteur* doit aussi fournir et installer des câbles de fibres optiques et des liens de communication de réserve qu'Hydro-Québec peut utiliser pour les essais ou pour la surveillance continue (voir, à la section 2, les enregistrements requis pour chaque module d'essais). Le *producteur* doit réaliser les mises hors tension nécessaires pour l'installation et le débranchement de l'instrumentation, et ce, sans frais pour Hydro-Québec.

Le *producteur* doit soumettre une unité de production à des essais afin de vérifier le respect de l'exigence lors de sous-tension (*Low Voltage Ride Through*), comme décrit dans les « Exigences techniques de raccordement de centrales au réseau de transport d'Hydro-Québec » [1]. Si différents types d'éoliennes (technologie, réglage ou version logicielle) sont utilisés dans une même centrale, une éolienne de chaque type doit être soumise aux essais.

Hydro-Québec peut assister aux essais ou accepter qu'une tierce partie indépendante le représente afin d'attester la validité des essais. Si le *producteur* souhaite, en collaboration avec son manufacturier, faire la démonstration du respect des exigences de *Low Voltage Ride Through* (module B) à l'extérieur du site, par exemple grâce à des laboratoires d'essais ou de « Power Hardware in the Loop » (PHIL), celui-ci doit le mentionner à Hydro-Québec qui se réserve le droit d'accepter ou de refuser la proposition. Le document intitulé « Programme général des essais de validation des centrales éoliennes raccordées au réseau de transport d'Hydro-Québec Module B – Essais types », mentionné à la section 2.2 « Module B – comportement lors de sous-tension (*Low Voltage Ride Through*) » élabore plus en détail les particularités pour ces options.

1.7 Certification

Si les résultats des essais sont jugés concluants par Hydro-Québec, la centrale éolienne est considérée comme répondant aux exigences d'Hydro-Québec en regard de la topologie présente et à la version du logiciel (des contrôleurs de l'éolienne et de la centrale) vérifiée au moment des essais. Pendant toute la durée de l'exploitation de la centrale éolienne, le *producteur* doit aviser Hydro-Québec si une nouvelle version des logiciels est implantée et documenter les modifications apportées dans cette nouvelle version. Il doit, au préalable à l'implantation du changement, soumettre à Hydro-Québec une demande de modification substantielle désignée¹ en respect des directives et procédures d'Hydro-Québec et du NERC. Hydro-Québec peut, dans l'un ou l'autre de ces cas, exiger que soit reprise une partie ou la totalité des essais de validation, et ce, aux frais du *producteur*.

Hydro-Québec peut renoncer à exiger la réalisation de certaines parties des essais de validation pour les centrales dont la conception, les paramètres, le type d'éoliennes et la version du logiciel des contrôleurs ont déjà subi avec succès le programme d'essais de validation à une centrale intégrée à son réseau. Également, les essais pour confirmer le maintien en service de l'éolienne lors de sous-tension transitoire (*Low Voltage Ride Through*) peuvent ne pas être exigés si le *producteur* fournit un rapport complet portant sur des essais réalisés sur une unité de production identique (et avec une même version de logiciel) démontrant, à la satisfaction d'Hydro-Québec, qu'elle répond aux exigences d'Hydro-Québec sur ce point.

1.8 Système de surveillance

Certaines vérifications sont effectuées tout au long de l'exploitation de la centrale éolienne, au moyen d'un système de surveillance conformément aux normes de fiabilité en vigueur. C'est le cas des exigences en matière de qualité de l'onde (module G). Pour les autres modules, cette supervision est également utile puisque les essais programmés ne permettent de vérifier qu'un nombre limité de conditions d'exploitation et de perturbations. Elle peut aussi être utile pour valider la performance du système et des modèles de simulation.

1.9 Instrumentation de mesurage

L'instrumentation utilisée par le *producteur* aux fins d'enregistrement des essais doit posséder les caractéristiques techniques minimales suivantes :

¹ Hydro-Québec, Définition d'une « modification substantielle désignée » pour le Québec, Octobre 2024. Accessible au : https://www.hydroquebec.com/data/transenergie/raccordement-reseau/definition-modification-fac-002-4_2024-09-26.pdf

- Instrumentation numérique pour faciliter la superposition des résultats d'essais avec ceux des simulations numériques
- Démarrage de l'enregistrement et récupération des données rapides et simples
- Précision : 16 bits
- Nombre de canaux : minimum 16
- Inclusion de filtres antirecouvrement ajustables au taux d'échantillonnage ou selon la technique sigma-delta
- Taux d'échantillonnage et durée d'enregistrement : ajustables suivant les besoins de l'essai. Par exemple, une réponse à l'échelon du régulateur de tension nécessite un taux d'échantillonnage d'au moins 10 kHz et une durée d'enregistrement de l'ordre de 30 secondes, alors qu'une réponse à l'échelon pour vérifier un limiteur de surexcitation peut exiger un enregistrement sur plusieurs minutes, mais un taux d'échantillonnage réduit à 2 kHz est suffisant.

1.10 Vérifications périodiques

La fréquence des vérifications périodiques doit respecter au minimum le calendrier des normes NERC. Le *producteur* doit, à ses propres frais, réaliser ces essais et fournir les conditions appropriées, notamment pour l'installation de l'instrumentation nécessaire. Le *producteur* doit proposer un programme d'essais selon les exigences NERC. Hydro-Québec se réserve le droit de demander des essais supplémentaires et, si nécessaire, d'assister le *producteur* lors de l'exécution des essais.

2 Description des essais de validation

2.1 Module A – Régulation réactive primaire

La régulation réactive primaire est réalisée par une boucle de régulation locale à l'éolienne. Généralement, c'est la réponse dynamique de cette boucle de régulation qui caractérise la régulation réactive rapide (transitoire) de la centrale éolienne. Le programme suivant s'applique à cette situation générale où la puissance réactive nécessaire à la régulation provient uniquement des éoliennes. Toutefois, si la régulation réactive rapide est assurée par d'autres équipements ajoutés à la centrale (compensateurs par exemple), une procédure d'essais particulière sera réalisée afin d'apprécier la réponse transitoire de ces équipements et de statuer sur le respect des exigences.

2.1.1 But

Le but de ces essais est de mesurer la réponse locale dynamique d'une éolienne à une variation rapide de tension et de valider que cette réponse satisfait aux exigences en matière de régulation réactive rapide.

2.1.2 Description des essais

Les essais sont effectués sur une éolienne. L'éolienne doit être isolée de tout système de régulation secondaire de tension ou de puissance réactive. Pour chaque essai, la production de l'éolienne doit être supérieure à 30 % de sa puissance nominale ou selon les recommandations du manufacturier.

La partie 1 des essais consiste à provoquer des variations de tension instantanées et de faible amplitude du côté moyenne tension de l'éolienne (*tension terminale*). Si l'on dispose d'un banc d'essai isolant l'éolienne via une impédance et qui permet de contrôler sa *tension terminale*, les variations de tension seront faites par ce système. Dans le cas contraire, les variations de tension sont générées par des manœuvres sur le réseau (manœuvres de batteries de condensateurs, d'inductances, etc.) ou encore en changeant la position des prises au(x) transformateur(s) de puissance du poste de départ.

La partie 2 des essais consiste à injecter de faibles échelons à la consigne de tension ou de MVar de durée limitée, directement au système de régulation de tension/puissance réactive de l'éolienne. Ces essais ne sont possibles que si l'éolienne possède un système de régulation accessible.

La partie 3 des essais consiste à observer quelle est la valeur par défaut adoptée par les éoliennes pour la régulation primaire lorsqu'une perte de télécommunication survient avec le contrôleur au point de raccordement de l'installation et lorsque celle-ci est rétablie.

Si le *producteur* désire réaliser ces essais sur l'éolienne à l'aide de banc d'essai de type PHIL (« Power Hardware in the loop ») ou SIL (« Software in the loop »), celui-ci peut proposer à Hydro-Québec une procédure d'essais. Hydro-Québec se réserve le droit de refuser ces méthodes si la procédure est jugée non adéquate pour observer le comportement désiré.

2.1.2.1 Partie 1 – Perturbations externes

Essai A1.1 Hausse instantanée de la *tension terminale* de l'ordre de 2 %

Essai A1.2 Baisse instantanée de la *tension terminale* de l'ordre de 2 %

Essai A1.3 Hausse instantanée de la *tension terminale* de l'ordre de 5 %

Essai A1.4 Baisse instantanée de la *tension terminale* de l'ordre de 5 %

2.1.2.2 Partie 2 – Changement de consignes

Essai A2.1 Échelon positif de référence de tension de l'ordre de 2 % ou de référence de puissance réactive de l'ordre de 5 % et d'une durée de 1/2 à quelques secondes

Essai A2.2 Échelon négatif de référence de tension de l'ordre de 2 % ou de référence de puissance réactive de l'ordre de 5 % et d'une durée de 1/2 à quelques secondes

Essai A2.3 Échelon positif de référence de tension de l'ordre de 5 % ou de référence de puissance réactive de l'ordre de 10 % et d'une durée de 1/2 à quelques secondes

Essai A2.4 Échelon négatif de référence de tension de l'ordre de 5 % ou de référence de puissance réactive de l'ordre de 10 % et d'une durée de 1/2 à quelques secondes

2.1.2.3 Partie 3 – Perte télécommunication

Essai A3.1 Perte de télécommunication entre l'éolienne et le contrôleur de parc et retour de la télécommunication. La consigne de tension ou de puissance réactive doit être différente que la consigne par défaut programmée.

2.1.3 Enregistrements

Les signaux suivants doivent être enregistrés à l'éolienne :

- Tensions des trois phases du côté basse tension du transformateur de l'éolienne. Pour les technologies possédant des tensions différentes au niveau du stator et du convertisseur, les tensions des trois phases de chacun sont requises.
- Courants des trois phases du côté basse tension du transformateur de l'éolienne. Pour les technologies possédant des courants différents au niveau du stator et du convertisseur, les courants des trois phases de chacun sont requis.

2.2 Module B – Comportement lors de sous-tension (*Low Voltage Ride Through*)

Le module B fait l'objet d'un document distinct intitulé « Programme général des essais de validation des centrales éoliennes raccordées au réseau de transport d'Hydro-Québec Module B – Essais types », car il est indépendant du site et plutôt propre à la technologie tant que celle-ci représente des groupes de réglages et des fonctionnalités similaires, notamment le ratio de court-circuit, les fonctionnalités sous-synchrones et les stratégies de contrôle en cas de perturbations. Il demeure toutefois que les essais présentés dans ce Module B sont requis pour l'acceptation des essais de validation.

2.3 Module C – Comportement en fréquence et réponse inertielle

2.3.1 But

Le but de ces essais est de vérifier que les éoliennes respectent les exigences en matière de régulation de fréquence (comportement en fréquence et réponse inertielle).

2.3.2 Description des essais

Les essais sont effectués avec au moins 95 % des éoliennes en service et en production ou seulement 1 éolienne à l'arrêt. La condition la plus permissive s'applique.

Les essais consistent à appliquer des signaux de fréquence de durée limitée, directement au système de régulation de fréquence du parc éolien via une entrée conçue pour ces essais fournie par le turbinier. Le taux de rampe de retour de la fréquence est toujours fixe à une valeur de 0.05 Hz/s à la suite d'une période de stabilisation de 30 secondes débutant à la suite de l'événement.

2.3.2.1 Partie 1 – Comportement en sousfréquence

Essai	Nadir de fréquence (Fmin)	Taux de variation (r)	Niveau de production requis	Consigne de téléplafonnement préalable à l'essai
C1.1	58.5 Hz	5 Hz/s	Entre 30 et 90 %	Non
C1.2	59.0 Hz	0.1 Hz/s	Entre 30 et 90 %	Non
C1.3	58.5 Hz	5 Hz/s	Entre 50 et 90 %	Oui, à 30 %
C1.4	59.0 Hz	0.1 Hz/s	Entre 50 et 90 %	Oui, à 30 %
C1.5	Répéter essais C1.1 deux fois consécutives avec 2 minutes d'intervalle			
C1.6	Répéter essais C1.3 deux fois consécutives avec 2 minutes d'intervalle			

2.3.2.2 Partie 2 – Comportement en surfréquence

Essai	Fréquence maximale (Fmax)	Taux de variation (r)	Niveau de production requis	Consigne de réduction de puissance active
C2.1	60.35 Hz	0.05 Hz/s	Entre 30 et 90 %	Non
C2.2	60.8 Hz	0.05 Hz/s	Entre 30 et 90 %	Non
C2.3	61.0 Hz	0.1 Hz/s	Entre 50 et 90 %	Non
C2.4	61.2 Hz	5.0 Hz/s	Entre 50 et 90 %	Non

2.3.3 Enregistrements

Les signaux suivants sont enregistrés. L'installation d'équipement supplémentaire peut être requise dans certains cas en fonction de la conception du parc :

- Tensions des trois phases du côté basse tension du transformateur de l'éolienne. Pour les technologies possédant des tensions différentes au niveau du stator et du convertisseur, les tensions des trois phases de chacun sont requises.
- Courants des trois phases du côté basse tension du transformateur de l'éolienne. Pour les technologies possédant des courants différents au niveau du stator et du convertisseur, les courants des trois phases de chacun sont requis.
- Tension d'une phase à la moyenne tension des transformateurs éleveurs de parc
- Tensions des trois phases du point de raccordement du parc éolien
- Courants des trois phases du point de raccordement du parc éolien
- Vitesse du rotor, position des pales et la vitesse du vent à la même éolienne
- Signaux d'entrée et de sortie du système de régulation de fréquence

2.4 Module D – Régulation de tension secondaire

La régulation de tension secondaire est un complément à la régulation primaire, et peut la remplacer lorsqu'elle est suffisamment rapide. Elle permet notamment de contrôler la tension du côté haute tension des installations du *producteur* (ou au point de raccordement). Le programme d'essais suivant s'applique lorsque la boucle de régulation secondaire est gérée par un système, que nous nommons *contrôleur de tension*, qui contrôle la production réactive des éoliennes en fonction d'une consigne de tension à la haute tension du poste de départ. Ce programme s'applique donc au cas général où la puissance réactive provient uniquement des éoliennes. Si la régulation de tension est assurée par d'autres équipements ajoutés à la centrale (compensateurs et/ou éléments shunts manœuvrés dynamiquement par exemple), une procédure d'essais particulière sera réalisée afin d'apprécier la réponse de ces équipements et de statuer sur le respect des exigences.

2.4.1 But

Le but de ces essais est de mesurer la réponse du système de régulation secondaire et de valider que cette réponse, en complément à la régulation primaire, permet de satisfaire aux exigences en matière de régulation de tension.

Les essais permettent aussi de vérifier le fonctionnement de la régulation avec statisme permanent ainsi que les performances lorsque le parc éolien opère en fournissant seulement de la puissance réactive, dénommé ici comme le mode « STATCOM ».

Finalement, les essais servent également à vérifier la dynamique de la puissance réactive à la centrale lorsque le contrôleur de tension est mis en service et hors service.

2.4.2 Description des essais

Les essais sont réalisés avec au moins 95 % des éoliennes en service ou une seule éolienne à l'arrêt. La condition la plus permissive s'applique. La production de la centrale doit être supérieure à 30 % de la puissance nominale pour les séries d'essais D1 à D3. Pour la série d'essais DS, la centrale doit être en marche dans le mode dit « STATCOM », où la production des éoliennes est nulle. Hydro-Québec peut exiger certaines conditions particulières d'opération, telle que le rotor à l'arrêt pour les éoliennes de type 3.

La partie D1 des essais consiste à appliquer des variations de tension de faible amplitude sur le réseau. Ces variations de tension sont générées par des manœuvres sur le réseau (manœuvres de batteries de condensateurs, d'inductances, de changeurs de prises, etc.).

La partie D2 des essais consiste à appliquer des échelons de consignes au contrôleur de tension du parc éolien.

La partie D3 des essais consiste à mettre le contrôleur de tension hors service et le remettre en service une fois la puissance réactive stabilisée aux éoliennes. Elle est réalisée avec une consigne pré-essais différente de la valeur par défaut programmée.

La partie DS des essais consiste à appliquer les mêmes essais des parties D1, D2 et D3, mais lorsque le parc opère en mode « STATCOM » pour en valider le comportement.

Si des éléments shunts manœuvrés dynamiquement sont présents dans l'installation, les essais doivent être effectués avec et sans ses équipements. Afin de démontrer la capacité de régulation dynamique de l'installation, elle doit offrir les performances attendues sans devoir manœuvrer les éléments shunts pour une période minimale de 30 secondes.

Le parc éolien devra être réglé avec le statisme permanent établi lors des réglages du parc éolien avant de procéder aux essais. Ces parties seront ensuite reprises avec statisme permanent nul ou différent si exigé par l'ingénieur approuvant les essais. Également, ces parties pourront être reprises pour les différents modes de contrôle du parc éolien. (contrôle de tension, de puissance réactive, de facteur de puissance, etc.)

Tout changement de référence ou de consigne doit s'effectuer de façon instantanée et non sous forme de rampes.

2.4.3 Liste des essais

Essai	Variation de tension	Type de variation	Niveau de production requis	Statisme
D1.1	2 %	Hausse tension réseau	Entre 30 et 100 %	Oui
D1.2	- 2 %	Baisse tension réseau	Entre 30 et 100 %	Oui
D1.3	+ 5 %	Hausse tension réseau	Entre 30 et 100 %	Oui
D1.4	- 5 %	Baisse tension réseau	Entre 30 et 100 %	Oui
D1.5	- 5 %, suivi de + 5 % après quelques secondes	Baisse et hausse tension réseau	Entre 30 et 100 %	Oui
D2.1	+ 2 %	Hausse de consigne	Entre 30 et 100 %	Oui
D2.2	- 2 %	Baisse de consigne	Entre 30 et 100 %	Oui
D2.3	+ 5 %	Hausse de consigne	Entre 30 et 100 %	Oui

D2.4	- 5 %	Baisse de consigne	Entre 30 et 100 %	Oui
D2.5	- 5 %, suivi de + 5 % après quelques secondes	Baisse et hausse de consigne	Entre 30 et 100 %	Oui
D3.1	Mettre hors service le contrôleur de tension jusqu'à ce que la puissance des éoliennes soit stabilisée. La production du parc éolien doit être entre 30 et 100 %. Le parc éolien doit produire une puissance réactive équivalente à 50% de sa capacité nominale. Cette consigne doit être différente de la valeur de consigne par défaut. Remettre ensuite en service le contrôleur de tension. Vérifier que le parc revient à sa valeur de consigne avec un délai maximal de 10 minutes.			Oui
Essais en mode « STATCOM »				
DS1.1	+ 2 %	Hausse tension réseau	0 %	Oui
DS1.2	- 2 %	Baisse tension réseau	0 %	Oui
DS1.3	+ 5 %	Hausse tension réseau	0 %	Oui
DS1.4	- 5 %	Baisse tension réseau	0 %	Oui
DS1.5	- 5 %, suivi de + 5 % après quelques secondes	Baisse et hausse tension réseau	0 %	Oui
DS2.1	+ 2 %	Hausse de consigne	0 %	Oui
DS2.2	- 2 %	Baisse de consigne	0 %	Oui
DS2.3	+ 5 %	Hausse de consigne	0 %	Oui

DS2.4	- 5 %	Baisse de consigne	0 %	Oui
DS2.5	- 5 %, suivi de + 5 % après quelques secondes	Baisse et hausse de consigne	0 %	Oui
DS3.1	Mettre hors service le contrôleur de tension jusqu'à ce que la puissance des éoliennes soit stabilisée. Le parc éolien doit être en mode « STATCOM ». Le parc éolien doit produire une puissance réactive équivalente à 50 % de sa capacité nominale. Cette consigne doit être différente de la valeur de consigne par défaut. Remettre ensuite en service le contrôleur de tension. Vérifier que le parc revient à sa valeur de consigne après un délai maximal de 10 minutes.			

2.4.4 Enregistrements

Les signaux suivants doivent être enregistrés:

- Tensions des trois phases du côté basse tension du transformateur de l'éolienne. Pour les technologies possédant des tensions différentes au niveau du stator et du convertisseur, les tensions des trois phases de chacun sont requises.
- Courants des trois phases du côté basse tension du transformateur de l'éolienne. Pour les technologies possédant des courants différents au niveau du stator et du convertisseur, les courants des trois phases de chacun sont requis.
- Tension d'une phase à la moyenne tension des transformateurs élévateurs de parc
- Tensions des trois phases du point de raccordement du parc éolien
- Courants des trois phases du point de raccordement du parc éolien
- Vitesse du rotor, position des pales et la vitesse du vent à la même éolienne

2.5 Module E – Facteur de puissance

Dans le programme d'essais suivant, nous considérons le cas général où la puissance réactive dynamique de la centrale provient uniquement des éoliennes. Pour les cas où le respect du facteur de puissance est assuré à l'aide d'équipements ajoutés à la centrale (compensateurs et/ou éléments shunts par exemple), une procédure d'essais particulière sera réalisée afin de statuer sur le respect des exigences.

2.5.1 But

Le but de ces essais est de vérifier que la centrale satisfait aux exigences en matière de facteur de puissance et de mesurer la capacité maximale de puissance réactive de la centrale et d'une éolienne.

2.5.2 Description des essais

Les essais doivent être idéalement faits avec toutes les éoliennes de la centrale en service. Dépendamment de l'essai, la production des éoliennes en service varie entre 10 % et 100 % de leur puissance nominale. Hydro-Québec peut dans certains cas accepter que les essais soient faits avec un nombre moindre d'éoliennes en service et extrapoler les résultats pour déduire la production (ou l'absorption) de puissance réactive maximale de la centrale. Des restrictions de tension sur le réseau local peuvent aussi imposer que ces essais soient faits avec un nombre restreint d'éoliennes.

Les essais consistent à produire et à absorber un maximum de puissance réactive, et ce avec différents niveaux de production et sur une plage de tension entre 0.90 pu et 1.10 pu du côté haute tension du poste de départ.

Ces essais peuvent nécessiter des changements de consignes au(x) système(s) de contrôle de tension.

Essai E1 Éoliennes à 100 % de leur puissance nominale, puissance réactive capacitive maximale, pendant 1 heure

Essai E2 Éoliennes à 100 % de leur puissance nominale, puissance réactive inductive maximale, pendant 1 heure

Essai E3 Éoliennes à 10 % de leur puissance nominale, puissance réactive capacitive maximale, pendant 1 heure

Essai E4 Éoliennes à 10 % de leur puissance nominale, puissance réactive inductive maximale, pendant 1 heure

Essai E5 Éoliennes en mode STATCOM, puissance réactive capacitive maximale, pendant 1 heure.

Essai E6 Éoliennes en mode STATCOM, puissance réactive inductive maximale, pendant 1 heure.

2.5.3 Enregistrements

Les signaux suivants doivent être enregistrés:

- Tensions des trois phases du côté basse tension du transformateur de l'éolienne. Pour les technologies possédant des tensions différentes au niveau du stator et du convertisseur, les tensions des trois phases de chacun sont requises.
- Courants des trois phases du côté basse tension du transformateur de l'éolienne. Pour les technologies possédant des courants différents au niveau du stator et du convertisseur, les courants des trois phases de chacun sont requis.
- Tension d'une phase à la moyenne tension des transformateurs éleveurs de parc
- Tensions des trois phases du point de raccordement du parc éolien
- Courants des trois phases du point de raccordement du parc éolien
- Vitesse du rotor et du vent à la même éolienne

2.6 Module F – Taux de rampe

Dans le programme d'essais suivant, nous considérons que le parc éolien opère en régime continu sans perturbations et que des consignes de rampes de puissance lui sont commandées. La procédure d'essais détaillée fera le détail de la séquence à effectuer.

2.6.1 But

Le but de ces essais est de vérifier que la centrale satisfait à l'exigence relative aux taux maximaux de rampe lorsqu'elle est démarrée ou arrêtée à l'aide d'un contrôleur de rampe.

2.6.2 Description des essais

Les essais consistent à faire une séquence d'arrêt de la centrale puis une séquence de démarrage et d'observer si les taux appliqués pour les rampes sont respectés.

Les essais sont effectués avec au moins 95 % des éoliennes en service et en production ou seulement 1 éolienne à l'arrêt. La condition la plus permissive s'applique. La production des éoliennes en service doit être supérieure à 50 % de leur puissance nominale.

<i>Essai F1</i>	Arrêt complet de la centrale
<i>Essai F2</i>	Démarrage de la centrale
<i>Essai F3</i>	Appliquer une consigne de plafonnement de 100 à 50 % de la puissance actuelle produite par le parc.
<i>Essai F4</i>	Retrait de la consigne de plafonnement de 100 à 50 %.
<i>Essai F5</i>	Appliquer une consigne de plafonnement de 100 à 50 % de la puissance actuelle produite par le parc. Ensuite, désactiver le lien de télécommunication entre le contrôleur de parc et les éoliennes lorsque le parc est plafonné avec une consigne de tension active avec le parc éolien en mode régulation de tension avec statisme permanent. L'essai perdure tant que le parc n'a pas atteint son régime permanent.

2.6.3 Enregistrements

Les signaux suivants doivent être enregistrés:

- Tensions des trois phases du côté basse tension du transformateur élévateur d'une éolienne
- Tensions des trois phases du côté basse tension du transformateur de l'éolienne. Pour les technologies possédant des tensions différentes au niveau du stator et du convertisseur, les tensions des trois phases de chacun sont requises.

- Courants des trois phases du côté basse tension du transformateur de l'éolienne. Pour les technologies possédant des courants différents au niveau du stator et du convertisseur, les courants des trois phases de chacun sont requis.
- Tensions des trois phases du point de raccordement du parc éolien
- Courants des trois phases du point de raccordement du parc éolien
- Vitesse du rotor, position des pales et la vitesse du vent à la même éolienne

2.7 Module G – Mesure en continu de la qualité de l’onde

Les paramètres de qualité de l’onde, ainsi que les niveaux de perturbations de l’onde électrique, sont évalués ou enregistrés en continu tout au long de l’exploitation de la centrale, au moyen d’un système de surveillance installé par Hydro-Québec (voir section 1.8). Ce système permet en principe de :

- vérifier le respect des « Limites d’émission des perturbations dans le réseau de transport d’Hydro-Québec » [2], comme démontré dans l’*étude d’émission* fournie par le *producteur* ;
- assurer le suivi de la qualité de la tension d’alimentation conforme aux « Caractéristiques de la tension fournie par le réseau de transport d’Hydro-Québec » [3] ;
- soutenir les études de réseaux et l’analyse d’événements, en coordination avec les données recueillies à d’autres points de mesure dans le réseau d’Hydro-Québec.

Des mesures et évaluations doivent toutefois être réalisées dans un environnement contrôlé pour simplifier les vérifications et assurer une interprétation rigoureuse des résultats.

Conformément à la section 3.6 du document [2], Hydro-Québec peut demander une nouvelle évaluation du respect des limites d’émission ainsi que la mise en place de moyens de mitigation ou l’application de restrictions de fonctionnement de la centrale, en cas de non-respect des limites d’émission par la centrale.

2.7.1 But

Le but de ces essais est de :

- caractériser la performance de la chaîne de mesure ;
- vérifier si la précision du transformateur de tension (ou celle de la chaîne de mesure de tension) satisfait à l’exigence applicable, soit la conformité à l’extension de classe de précision 0,5-WB1 pour les harmoniques jusqu’à 3 kHz, définie au tableau 8 de la norme internationale IEC 61869-1:2023 [4], version actuellement en vigueur;
- mesurer la tension d’alimentation fournie par le réseau d’Hydro-Québec au point de raccordement à haute tension sans l’influence de la centrale, en particulier pour évaluer les harmoniques de tension préexistants ;
- vérifier que les niveaux des différentes perturbations de l’onde électrique demeurent inférieurs ou égaux aux limites d’émission applicables à la centrale, comme établi dans l’*étude d’émission*, au point de raccordement à haute tension.

2.7.2 Description des essais

Dans le cadre du présent module relatif à la mesure en continu de la qualité de l’onde au point de raccordement à haute tension de la centrale, les exigences relatives à la qualité de l’onde ne font généralement pas l’objet d’essais programmés, à l’exception de l’évaluation de la performance de précision de la chaîne de mesure.

En présence de particularités techniques ou de résultats non concluants, des mesures complémentaires ou des essais spécifiques peuvent être réalisés, selon un protocole accepté par Hydro-Québec.

2.7.2.1 Précision des chaînes de mesure et des transformateurs de tension

Hydro-Québec caractérise la performance de précision des chaînes de mesure de courant et de tension ainsi que celle des transformateurs de tension, à la température ambiante et sur chaque phase.

La performance de précision des chaînes de mesure inclut, le cas échéant, l'application d'un facteur de correction à l'enregistreur. Le facteur de correction, s'il y a lieu, ainsi que le rapport de transformation des transformateurs de mesure étalonné par le fabricant, doit être indiqué. Si le rapport de transformation est non disponible, il peut être mesuré lors des essais.

La caractérisation de la performance est réalisée à partir de l'instrumentation d'Hydro-Québec et selon la procédure détaillée des essais de validation particulière à la centrale.

2.7.2.2 Tension d'alimentation fournie par le réseau d'Hydro-Québec

La tension sur les trois phases est mesurée au point de raccordement à haute tension, sans l'influence de la centrale, sur une période convenue entre le *producteur* et Hydro-Québec. Aucun équipement de la centrale susceptible d'influencer les niveaux de perturbations de l'onde de tension ne doit être raccordé, en particulier les équipements générateurs d'harmoniques et les équipements capacitifs pouvant interagir avec le réseau d'Hydro-Québec, incluant le réseau collecteur de câbles à moyenne tension.

Le raccordement des transformateurs élévateurs au poste de départ, à vide ou alimentant les services auxiliaires, est généralement acceptable.

2.7.3 Qualité de l'onde dans les conditions de fonctionnement de la centrale

Les niveaux des perturbations de l'onde électrique sont évalués au point de raccordement à haute tension, conformément aux indications de l'annexe B du document [2], puis comparés aux limites d'émission applicables à la centrale, comme établi dans l'*étude d'émission*.

Ces limites portent notamment sur les harmoniques, les interharmoniques, les variations rapides de tension, le papillotement de courte durée et le déséquilibre de courant.

Dans le cas de dépassement, une analyse des niveaux d'émission est effectuée à partir des données de mesure. Si cette analyse ne permet pas de conclure, des essais et mesures complémentaires peuvent être exigés, selon un protocole de mesure accepté par Hydro-Québec.

2.7.4 Enregistrements

2.7.4.1 Précision des chaînes de mesure et des transformateurs de tension

Les paramètres de précision suivants doivent être évalués ou fournis, au minimum :

- pour chaque chaîne de mesure et pour les trois phases :
 - rapport de transformation des transformateurs de mesure étalonné par le fabricant ou mesuré par Hydro-Québec ;

- précision de la mesure de l'amplitude et de la phase à la fréquence fondamentale, selon le paramètre de qualité de l'onde considéré, notamment pour la tension de phase et pour la tension fondamentale ;
- pour chaque type de chaîne de mesure et chaque modèle de transformateur de tension :
 - réponse en fréquence jusqu'à 10 kHz ;
 - erreur de rapport aux fréquences jusqu'à 3 000 Hz, exprimée en pourcentage ;
 - erreur de phase aux fréquences jusqu'à 3 000 Hz, exprimée en degrés.

2.7.4.2 Mesure en continu

La mesure en continu au point de raccordement inclut des enregistrements effectués de manière continue ainsi que des enregistrements déclenchés par dépassement de seuil.

Les paramètres de qualité de l'onde à enregistrer sont harmonisés avec les paramètres utilisés dans les enregistreurs du réseau de transport d'Hydro-Québec. Ils correspondent à des mesures de tension, de courant, de puissance et d'angle de phase pour chacune des trois phases ainsi qu'à la mesure du courant de neutre, au besoin. Ces paramètres sont principalement définis dans les documents [2] et [3].

En complément, pour certains harmoniques ou interharmoniques de tension et de courant, les valeurs agrégées sur chaque intervalle de 180 périodes (ou l'équivalent), conformément à la classe A de la norme IEC 61000-4-30 [5], doivent être enregistrées pour les paramètres suivants :

- le phaseur des composantes directe, inverse et homopolaire, selon les composantes symétriques de Fortescue, où :
 - l'amplitude est exprimée en pourcentage de la composante directe de la fréquence fondamentale ;
 - l'angle de phase dominant est calculé selon l'équation D.3 de la norme IEC 61400-21-1 [6], et exprimé en degrés ;
- le phaseur de la tension de phase et du courant de barre, au besoin.

Les rangs harmoniques et les précisions additionnelles, le cas échéant, seront spécifiés dans la procédure détaillée des essais.

Les données doivent être disponibles sous forme de fichiers CSV ou de fichiers Comtrade dans le cas des formes d'onde. Le mesurage et son horodatage doivent être synchronisés sur l'échelle de temps UTC (temps universel coordonné) conformément à la classe A de la norme IEC 61000-4-30 [5].

2.8 Module H – Mise sous tension des transformateurs élévateurs au poste de départ

Bien que la mesure en continu de la qualité de l'onde, décrite à la section 2.7, permette de vérifier le respect des limites d'émission tout au long de l'exploitation de la centrale, les essais en environnement contrôlé lors de la mise sous tension des transformateurs élévateurs au poste de départ visent à obtenir des données plus précises afin de permettre une interprétation rigoureuse des résultats.

2.8.1 But

Le but de l'essai est de mesurer et de caractériser la variation de la tension causée par la mise sous tension des transformateurs élévateurs au poste de départ, incluant le moyen de mitigation le cas échéant, afin de la comparer aux résultats présentés dans l'*étude d'émission*, ainsi qu'aux limites définies à la section 7.7.4 des « Exigences techniques de raccordement de centrales au réseau de transport d'Hydro-Québec » [1].

2.8.2 Description des essais

La variation de la tension causée par chaque mise sous tension des transformateurs élévateurs au poste de départ est mesurée et caractérisée par les paramètres indiqués à la section 2.8.3. Les mises sous tension sont effectuées à vide, avec le dispositif de mitigation le cas échéant, selon la séquence prévue dans l'*étude d'émission*. Dans le cas où plus d'une séquence est prévue, chaque séquence doit être exécutée conformément à ce qui est prévu dans l'*étude d'émission*.

Au moins quatre mises sous tension doivent faire l'objet d'une mesure, pour chaque transformateur élévateur à haute tension.

La variation maximale de la tension et l'indice de la variation rapide de tension (VRT) sont comparés aux limites correspondantes, définies à la section 7.7.4 du document [1].

2.8.3 Enregistrements

Pour chaque mise sous tension, les signaux et paramètres suivants sont enregistrés à la haute tension du poste de départ :

- Tension des trois phases haute tension :
 - Courbe de la variation de la tension efficace évaluée sur une fenêtre glissante d'une durée correspondant à une période de la fréquence fondamentale, rafraîchie à chaque demi-période, conformément à la norme IEC 61000-4-30 Classe A [5] ;
 - Variation maximale de la tension efficace par rapport à la moyenne arithmétique sur environ 1 seconde de valeurs efficaces juste avant la mise sous tension, conformément à la norme IEC 61000-4-30 Classe A [5] ; cette variation est exprimée en pourcentage de la tension nominale du réseau à haute tension ;
 - Indice VRT, évalué selon la méthode définie à l'annexe B.1 des « Limites d'émission de perturbations dans le réseau de transport d'Hydro-Québec » [2] ;

- Instant de début de la variation de la tension, conformément à la norme IEC 61000-4-30 Classe A [5] ; le seuil de détection est normalement fixé à 2,5 % de la tension nominale, mais peut être réduit au besoin pour permettre l'enregistrement d'une variation de faible amplitude ;
- Durée de la variation de la tension, conformément à la norme IEC 61000-4-30 Classe A [5] ; le seuil de fin est identique au seuil de début ;
- Forme d'onde enregistrée;
- Courant des trois phases haute tension pour chaque transformateur élévateur:
 - Forme d'onde synchronisée avec celle de la tension ;
 - Valeur de crête maximale de courant durant la variation de la tension ;
- Flux magnétique calculé dans chaque transformateur élévateur pour les trois phases, à partir de la mesure de tension du côté parc éolien du disjoncteur qui manœuvre les transformateurs élévateurs.

Pendant une variation de la tension causée par la mise sous tension d'un transformateur élévateur, l'enregistrement des formes d'onde et la caractérisation de la variation de la tension doivent se poursuivre, même si un creux ou une surtension temporaire à fréquence industrielle est détecté.

2.9 Module I – Caractérisation de l'impédance fréquentielle

2.9.1 But

Les essais visent à vérifier l'impédance fréquentielle, notamment celle des onduleurs et de la centrale, dans différentes conditions de fonctionnement, afin de permettre la validation des données utilisées dans l'*étude d'émission*.

2.9.2 Description des essais

La caractérisation de l'impédance fréquentielle, exprimée en module et angle ou en résistance et réactance, doit être réalisée à partir de mesures effectuées :

- sur l'ensemble de la plage de fréquences d'intérêt, incluant les fréquences sous-synchrones, harmoniques et interharmoniques ;
- dans différentes conditions de fonctionnement possibles, en tenant compte de la présence ou de l'absence d'équipements susceptibles d'influencer les résultats ;
- pour les composantes symétriques de Fortescue : directe, inverse et, le cas échéant, homopolaire.

Les résultats doivent être transmis à Hydro-Québec s'il n'est pas celui qui les réalise et se réserve le droit de demander une révision de l'*étude d'émission*.

La caractérisation de l'impédance fréquentielle consiste à injecter dans la centrale un courant contenant plusieurs fréquences, afin de générer des tensions aux bornes de l'impédance à caractériser, à différents points de mesure. La fonction de transfert entre la tension et le courant est ensuite calculée à chacun de ces points pour obtenir l'impédance en fonction de la fréquence.

Le point d'injection du courant et les points de mesure doivent permettre de déterminer l'impédance fréquentielle propre à chaque équipement, notamment :

- les transformateurs de puissance ;
- les batteries de condensateurs ou filtres harmoniques ;
- les câbles des artères principales du réseau collecteur ;
- les différents modèles d'éoliennes.

Les essais doivent être réalisés dans les conditions suivantes :

- trois niveaux de puissance active différents des éoliennes, dont au moins deux présentent un écart minimal de 30 %, basé sur la puissance assignée de l'éolienne ;
- le mode de contrôle STATCOM (0% de puissance active) des éoliennes, si ce mode est prévu dans la centrale ;
- sans l'effet de l'impédance des éoliennes (notamment sans les filtres et l'onduleur), par exemple en ouvrant les disjoncteurs à moyenne tension de l'éolienne.

Lorsque possible, l'impédance fréquentielle du réseau vue au point de raccordement à haute tension de la centrale est également caractérisée et enregistrée pour chaque essai.

Les points de mesure sont généralement localisés comme suit :

- à la haute tension du poste de départ ;
- à la moyenne tension du poste de départ ;
- au primaire ou secondaire du transformateur de puissance d'au moins deux éoliennes (si possible).

La localisation précise de la mesure de courant sera déterminée par Hydro-Québec dans la procédure détaillée des essais.

Le point d'injection du courant contenant plusieurs fréquences est généralement localisé à moyenne tension dans le poste de départ.

2.9.3 Enregistrements

Pour chaque point de mesure, les signaux suivants doivent être enregistrés afin de permettre l'évaluation des composantes symétriques de Fortescue pertinentes sur l'ensemble de la plage de fréquences d'intérêt :

- la tension sur chacune des trois phases ;
- le courant sur chacune des trois phases.

L'instrumentation utilisée doit offrir une précision adéquate pour les fréquences allant jusqu'à au moins 3 000 Hz. La chaîne de mesure doit être caractérisée, en particulier les transformateurs de tension.

Pour chaque essai, les paramètres suivants doivent être enregistrés aux points de mesure correspondant à chaque éolienne ciblée ainsi qu'à la haute tension du poste de départ de la centrale :

- le niveau des puissances active et réactive triphasées à la fréquence fondamentale, produites par les éoliennes et par la centrale, respectivement ;
- le taux de déséquilibre de tension inverse (U_2/U_1) à la fréquence fondamentale aux différents points de mesure de tension;
- la température extérieure ;
- l'horodatage ;
- tout autre paramètre permettant de caractériser les conditions d'essai susceptibles d'influencer les résultats (p. ex. : la vitesse du vent à l'éolienne, la vitesse du rotor, l'angle des pâles, etc.). Toutes ces données doivent être sur la même éolienne.

2.10 Module J – Signaux externes

2.10.1 But

Le but de ces essais est de vérifier que la centrale satisfait à l'exigence relative aux signaux en provenance des systèmes externes afin d'assurer que ceux-ci remplissent leur fonction d'enregistrement, de consignes d'exploitation ainsi que de rapatriement de l'information vers les systèmes d'Hydro-Québec.

2.10.2 Description des essais

Le parc éolien doit produire entre 50 et 100 % de sa capacité nominale.

<i>Essai J1</i>	Envoi d'une consigne de plafonnement lent à 20, 50 et 75 % de la production selon le vent disponible du parc éolien suivi du retrait de la consigne lorsque le parc plafonné est en régime permanent
<i>Essai J2</i>	Envoi d'une consigne de tension à 0.98 pu de la tension nominale de la haute tension du poste du parc éolien avec le parc en mode régulation de tension avec statisme permanent.
<i>Essai J3</i>	Envoi d'une consigne de tension à 1.02 pu de la tension nominale de la haute tension du poste du parc éolien avec le parc en mode régulation de tension avec statisme permanent.
<i>Essai J4</i>	Envoi d'une consigne de tension à 0 pu de la tension nominale de la haute tension du poste de raccordement avec le parc éolien en mode régulation de tension avec statisme permanent.
<i>Essai J5</i>	Envoi d'une consigne de tension à 10 pu de la tension nominale de la haute tension du poste de raccordement avec le parc éolien en mode régulation de tension avec statisme permanent.
<i>Essai J6</i>	Désactivation du lien de télécommunication entre Hydro-Québec et le <i>producteur</i> lorsque le parc est plafonné avec une consigne de tension active avec le parc éolien en mode régulation de tension avec statisme permanent. L'essai perdure tant que le parc n'a pas atteint son régime permanent et que la télécommunication n'est pas rétablie.

2.10.3 Enregistrements

Les signaux suivants doivent être enregistrés:

- Tensions des trois phases du côté basse tension du transformateur de l'éolienne. Pour les technologies possédant des tensions différentes au niveau du stator et du convertisseur, les tensions des trois phases de chacun sont requises.

- Courants des trois phases du côté basse tension du transformateur de l'éolienne. Pour les technologies possédant des courants différents au niveau du stator et du convertisseur, les courants des trois phases de chacun sont requis.
- Tension d'une phase à la moyenne tension des transformateurs élévateurs de parc
- Tensions des trois phases du point de raccordement du parc éolien
- Courants des trois phases du point de raccordement du parc éolien
- Vitesse du rotor, position des pales et la vitesse du vent à la même éolienne

2.11 Module K – Comportement lors d'un îlotage

2.11.1 But

Le but de ces essais est de vérifier que la centrale ne perturbe pas excessivement le réseau lorsque celle-ci se retrouve soudainement en îlot avec ou sans charge à la suite d'une contingence. De plus, l'essai permet de vérifier que les surtensions ne sont pas trop sévères en amplitude, en durée et en contenu harmonique. Préalablement à l'essai, l'étude d'îlotage du parc éolien par Hydro-Québec à l'aide des modèles numériques transitoires fournis devra démontrer un comportement satisfaisant permettant la réalisation de l'essai. Le *producteur* doit aussi fournir à Hydro-Québec les fichiers de paramètres et la version de son système de contrôle. Ceux-ci doivent être représentatifs de ceux livrés avec les modèles de simulations fournis à Hydro-Québec.

2.11.2 Description des essais

Les essais s'effectuent en deux étapes :

- une première série est réalisée lorsqu'au moins 30% des éoliennes du parc sont synchronisées au réseau ;
- une seconde série est réalisée lorsqu'au moins 95 % des éoliennes sont en service et en production ou seulement 1 éolienne à l'arrêt. La condition la plus permissive s'applique.

Le parc éolien doit produire entre 10 et 20 % de sa capacité nominale, à moins d'avis contraire par l'ingénieur d'essai.

Le parc doit, à la suite de l'ouverture du disjoncteur principal de l'installation, être seul dans son îlot, c'est-à-dire sans charge à l'exception de ses services auxiliaires qui doivent être négligeables par rapport à la production produite. Aucune mise à la terre rapide haute tension ou moyenne tension du côté du poste de transformation ne doit être activée durant l'essai. L'essai K1 est répété à deux reprises pour chacune des deux étapes.

Essai K1 Ouverture du disjoncteur haute tension raccordant le parc éolien au point de raccordement avec le réseau d'Hydro-Québec. Le parc éolien doit avoir un échange nul de puissance réactive mesuré à son point de raccordement ou autre valeur déterminée par l'ingénieur d'essai selon les contraintes réseau.

2.11.3 Enregistrements

Les signaux suivants doivent être enregistrés:

- Tensions des trois phases du côté basse tension du transformateur de l'éolienne. Pour les technologies possédant des tensions différentes au niveau du stator et du convertisseur, les tensions des trois phases de chacun sont requises.
- Courants des trois phases du côté basse tension du transformateur de l'éolienne. Pour les technologies possédant des courants différents au niveau du stator et du convertisseur, les courants des trois phases de chacun sont requis.

- Tension d'une phase à la moyenne tension des transformateurs éleveurs de parc
- Tensions des trois phases du point de raccordement du parc éolien
- Courants des trois phases du point de raccordement du parc éolien
- Vitesse du rotor, position des pales et la vitesse du vent à la même éolienne

3 Liste des documents de référence

- [1] *Exigences techniques de raccordement de centrales au réseau de transport d'Hydro-Québec*, Décision D-2022-088 – en vigueur le 15 juillet 2022. Disponible en ligne sur le site public d'Hydro-Québec:
https://www.hydroquebec.com/data/transenergie/raccordement-reseau/Exigences_raccordement_centrales_2022-07-15.pdf
- [2] *Limites d'émission de perturbations dans le réseau de transport d'Hydro-Québec*, Décision D-2022-088 – en vigueur le 15 juillet 2022.
https://www.hydroquebec.com/data/transenergie/raccordement-reseau/Limites_emission_2022-07-15.pdf
- [3] *Caractéristiques de la tension fournie par le réseau de transport d'Hydro-Québec*, Décembre 2016.
<https://www.hydroquebec.com/data/transenergie/pdf/qualite-onde-tension-transport.pdf>
- [4] *Transformateurs de mesure – Partie 1 : Exigences générales*. Norme internationale IEC 61869-1:2023.
- [5] *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-30 : Techniques d'essai et de mesure – Méthodes de mesure de la qualité de l'alimentation*. Norme internationale IEC 61000-4-30:2025.
- [6] *Systèmes de génération d'énergie éolienne – Partie 21-1 : Mesurage et évaluation des caractéristiques électriques – Éoliennes*. Norme internationale IEC 61400-21-1:2019.