

Cahier des charges des installations de production répondant au besoin de Puissance Garantie dans l'Ouest Guyanais

Version	Date d'application	Nature de la modification	Annule et remplace
2	10/01/2023	Version post concertation	/
3	27/06/2025	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Changement de template du document ▪ Modification de la définition de Sources ▪ Modification de la définition des caractéristiques du SSEE qui sont à présent définies « au point de comptage stockage défini dans le contrat d'achat » et plus au « PDL » afin de prendre en compte les installations PV + SSEE en DC coupling ▪ Réécriture de la limitation de Pracc pour les installations disposant de sources interfacées par électroniques de puissance (REQ-5) ▪ Ajout d'exigences sur le cyclage des SSEE (REQ-6, REQ-7, REQ-8) ▪ Modification du $t_{r5\%}$ demandé pour les SSEE grid following en raccordement AC direct pour uniformisation avec le référentiel technique SEI (REQ-41) ▪ Ajout d'exigences pour les sources PV + SSEE DC coupling (ajouts de façon générales aux exigences et exigences spécifiques REQ-47, REQ-48, REQ-49, REQ-50, REQ-65) ▪ Ajout d'une exigence pour le renvoi de tension depuis les GE du Producteur en moins de 3mn si les GE en ont la capacité constructive (REQ-56) ▪ Modification de l'exigence de retour de puissance active après un creux de tension pour uniformisation avec l'arrêté 2020 et le référentiel technique SEI (REQ-61) ▪ Mise à jour de la numérotation des exigences ▪ Distinctions du fonctionnement « îloté » utilisé à présent uniquement pour l'installation du producteur et de fonctionnement en « réseau séparé » du poste source de Margot ▪ Ajout des conditions pour lesquelles l'installation du producteur doit être en mesure d'appliquer une consigne d'îlotage d'EDF (Note 10) 	2

SOMMAIRE

1	Objectif du document.....	5
2	Définitions	5
2.1	Général.....	5
2.2	Caractéristiques nominales de l'installation et des sources.....	5
2.3	Caractéristiques spécifiques aux systèmes de stockage d'énergie électrique	6
3	Cadre normatif	9
4	Raccordement	9
5	Caractéristiques nominales	10
5.1	Puissance active	10
5.2	Capacité en énergie pour les SSEE en raccordement AC direct ou faisant partie d'une installation DC coupling.....	10
5.3	Puissance réactive.....	10
6	Pilotage.....	12
6.1	Exigences générales	12
6.2	Pilotage au PDL	13
6.3	Pilotage des sources.....	13
7	Services-système	13
7.1	Réglage de tension et de la puissance réactive	13
7.2	Réglage primaire de fréquence.....	15
7.3	Blackstart et renvoi de tension	20
8	Tenue aux variations normales et exceptionnelles de la tension et de la fréquence	21
8.1	Variations normales et exceptionnelles de la tension d'exploitation	21
8.2	Variations normales et exceptionnelles de la fréquence d'exploitation	21
9	Tenue aux perturbations	22
9.1	Exigences pour le SSEE et la production PV.....	22
9.2	Injection et absorption de courant de défaut.....	23
10	Qualité de la tension	24
11	Manœuvres	25
11.1	Couplage à un réseau sous tension	25
11.2	Îlotage de l'installation en vue d'un recouplage rapide au réseau EDF sous tension	25
11.3	Découplage des sources du réseau.....	25
11.4	Energisation de l'installation par le réseau.....	25
12	Téléinformations	27
13	Modèles numériques.....	29
13.1	Modèles PowerFactory	29
13.2	Manuel utilisateur.....	29
13.3	Mise à jour des modèles et du manuel utilisateur	30

14	Etudes et essais préalables à la mise en service	30
14.1	Etudes	30
14.2	Essais	30
15	ANNEXE : Performances dynamiques - définitions	31

1 Objectif du document

Ce document constitue le cahier des charges pour le raccordement des installations de production répondant au besoin de puissance garantie raccordées en HTA au poste électrique de Margot dans l'ouest Guyanais. Le GRD examinera la conformité des projets à ce cahier des charges lors du processus de saisine de la CRE.

Note 1. Ce cahier des charges a été rédigé pour des installations de production génériques intégrant :

- des groupes de production thermiques,
- une centrale de production photovoltaïque
- un système de stockage d'énergie électrique (SSEE) en raccordement AC direct au Réseau (c'est-à-dire ne faisant pas partie d'une installation DC couplage avec du PV).
- Une installation DC couplage PV + SSEE

Si l'installation du producteur n'intègre qu'une partie de ces éléments, seules les exigences les concernant sont applicables. Si l'installation du producteur intègre d'autres types de moyens de production ou de stockage, SEI pourra compléter ce cahier des charges par des exigences supplémentaires les concernant.

Note 2. Sauf mention contraire, les exigences techniques contenues dans ce document sont données au PDL de l'installation et doivent être maintenues pendant l'entière durée du contrat liant le Producteur à SEI.

2 Définitions

2.1 Général

- **Réseau** : Réseau de distribution
- **SEI** : Gestionnaire du Réseau de Distribution
- **PDL** : Point de livraison de l'installation, correspond à la limite de propriété entre le propriétaire de l'installation et SEI telle que défini dans la convention de raccordement et de conduite ;
- **EMS** : Energy Management System / Système de Management de l'Energie ;
- **ROCOF** : Rate of change of frequency / taux de variation de la fréquence ;
- **PV** : Moyens de production photovoltaïque
- **Installation** : L'installation de production
- **Producteur** : Exploitant de l'installation
- **SSEE** : Système de Stockage d'Energie Electrique
- **Sources** : Moyens de production et de stockage en raccordement AC direct de l'installation
- **pu** : per unit, ratio entre une grandeur quelconque et sa valeur nominale

2.2 Caractéristiques nominales de l'installation et des sources

- **P_{racc}** : Puissance active maximale que l'installation peut injecter en régime stabilisé

- $P_{max inj}$: Puissance active maximale qu'une source peut injecter en régime stabilisé
- $P_{max abs}$: Puissance active maximale que l'installation / qu'une source peut absorber en régime stabilisé
- $Q_{max inj}$: Puissance réactive maximale que l'installation / qu'une source peut injecter en régime stabilisé
- $Q_{max abs}$: Puissance réactive maximale que l'installation / qu'une source peut absorber en régime stabilisé
- S_n : Puissance apparente nominale

$$S_n = \sqrt{P_{max inj}^2 + Q_{max inj}^2}$$

- U_n : Tension efficace entre phases nominale
- I_n : Courant de phase efficace nominal AC

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n}$$

- I_{cc} : Le courant AC efficace garanti par phase en défaut en situation de creux de tension

- **Puissance garantie :**

La puissance garantie est la puissance active minimale que l'installation est en capacité d'injecter à son PDL de façon continue, avec un délai entre la demande d'injection par SEI et l'injection effective inférieure ou égale à 15mn et avec un taux de disponibilité supérieur à 99,97% en moyenne sur l'année contractuelle, déduction faite des périodes d'indisponibilité programmée. Pour information l'appel de la puissance garantie pourrait se faire en continu pendant 3 semaines ou plus.

2.3 Caractéristiques spécifiques aux systèmes de stockage d'énergie électrique

2.3.1 State of Charge

- **Stock d'énergie disponible au point de comptage stockage défini dans le contrat d'achat :** énergie que le SSEE est capable d'injecter à sa $P_{max inj}$ sur le réseau à un instant donné.
- **SoC :** State Of Charge ou Etat de charge

Le SoC est défini comme la capacité d'énergie déchargeable à un instant donné divisée par la capacité d'énergie maximale déchargeable mise à disposition de SEI à ce même instant.

La gestion du SoC par SEI sera la suivante :

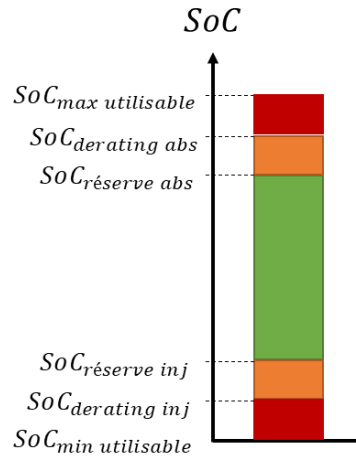


Figure-1 Gestion du stock d'énergie du SSEE réalisée par SEI

- **$SoC_{max\ utilisable}$** : la limite haute de SoC utilisable par SEI ;
- **$[SoC_{derating\ abs} ; SoC_{max\ utilisable}]$** : la plage de SoC pour laquelle le SSEE n'est plus capable de fonctionner à sa $P_{max\ abs}$;
- **$[SoC_{réserve\ abs} ; SoC_{derating\ abs}]$** : la réserve de SoC en absorption que SEI gardera pour gérer les fortes hausses de fréquence ;
- **$[SoC_{réserve\ inj} ; SoC_{réserve\ abs}]$** : la plage de SoC principale, utilisée par SEI ;
- **$[SoC_{derating\ inj} ; SoC_{réserve\ inj}]$** : la réserve de SoC en injection que SEI gardera pour gérer les fortes baisses de fréquence ;
- **$[SoC_{min\ utilisable} ; SoC_{derating\ inj}]$** : la plage de SoC pour laquelle le SSEE n'est plus capable de fonctionner à sa $P_{max\ injection}$;
- **$SoC_{min\ utilisable}$** : la limite basse de SoC utilisable par SEI ;

2.3.2 Round Trip Efficiency

- **RTE** : Round Trip Efficiency ou rendement aller-retour.

Le RTE est le rapport en pourcents de l'énergie injectée E_{inj} sur l'énergie absorbée E_{abs} au point de comptage stockage défini dans le contrat d'achat, sur une période de référence, avec un SoC initial et un SoC final égaux, en considérant un profil de charge décharge du SSEE donné.

$$RTE = 100 \times \frac{E_{inj}}{E_{abs}}$$

- **RTE maximal**

Le RTE maximal est le RTE calculé lors d'un cycle de charge – décharge du SSEE comprenant une phase de charge d'une énergie de $E_{max\ abs}$ à $P_{max\ abs}$ immédiatement suivi d'une phase de décharge d'une énergie de $E_{max\ inj}$ à $P_{max\ inj}$.

- **RTE opérationnel**

Le RTE opérationnel est le RTE calculé dans les conditions d'utilisation du stock d'énergie mis à disposition par SEI pour chaque période de référence. La période de référence du jour J :

- Commence par l'envoi par SEI de la première consigne d'absorption de puissance active du jour J ;
- S'achève à l'envoi par SEI de la première consigne d'absorption de puissance active du jour J+1.

3 Cadre normatif

Req-1. En l'absence d'exigence spécifique contenue dans le présent cahier des charges, ses annexes et documents associés, l'installation devra respecter les normes, standards et référentiels suivants ainsi que les amendements qui y sont associés :

- Les référentiels SEI REF disponibles sur le site internet <http://sei.edf.com> ;
- NF EN CEI 62933 : Systèmes de stockage de l'énergie électrique (SSEE) ;
- NF EN 50549-2 : Exigences relatives aux centrales électriques destinées à être raccordées en parallèle à des réseaux de distribution ;
- NFC 13200 : Installations électriques à haute tension pour les sites de production d'énergie électrique, les sites industriels, tertiaires et agricoles ;
- NFC 13100 : Postes de livraison alimentés par un réseau public de distribution HTA (jusqu'à 33 kV) ;
- CEI 60870-5-104 : Matériels et systèmes de téléconduite : Partie 5-104 : Protocoles de transmission ;
- CEI 61850 : Réseaux et systèmes de communication pour l'automatisation des systèmes électriques ;
- CEI 61000 (série) : Compatibilité électromagnétique (CEM) ;
- CEI 60255 : Relais de mesure et dispositifs de protection ;
- CEI 61000-3-6 : Electronic Compatibility part 3.6 : limits-assessment of emission limit for the connection of distorting installations to medium voltage, high voltage and extra high voltage power systems.

4 Raccordement

Note 3. L'installation sera raccordée sur un départ HTA dédié venant du poste source de Margot. Une fibre optique sera également installée pour assurer la communication entre SEI et le Producteur.

Req-2. La longueur du raccordement HTA entre le PDL et le départ du poste Margot doit être inférieure ou égale à 30 km.

5 Caractéristiques nominales

5.1 Puissance active

Req-3. L'installation devra avoir une puissance garantie entre 3 MW et 7 MW.

Req-4. Le producteur devra fournir un rapport décrivant sa solution de fourniture de puissance garantie avec un argumentaire technique explicite permettant de démontrer que le design de l'installation répond au niveau de puissance garantie déclaré selon la définition de la puissance garantie exprimée au chapitre 2.2.

Req-5. La puissance active en injection de l'installation P_{racc} ne devra pas excéder :

$$\min(3 \times \text{puissance garantie} ; 12 \text{ MW})$$

Tout aléa interne de l'installation ne doit pas entraîner une variation instantanée de puissance au PDL d'une valeur supérieure à P_{racc} .

Pour ce faire, SEI considère que l'installation ne doit pas avoir une capacité d'onduleur supérieure à 25 MVA.

5.2 Capacité en énergie pour les SSEE en raccordement AC direct ou faisant partie d'une installation DC coupling

Req-6. Le SSEE doit garantir les caractéristiques suivantes :

- *Puissance d'injection* : la puissance nette contractuelle en injection doit être définie à la centaine de kW près.
- *Puissance de soutirage* : la puissance nette contractuelle en soutirage doit être égale à la puissance nette contractuelle en injection, et doit être définie à la centaine de kW près.
- *Stock utile* : la puissance nette contractuelle en injection doit pouvoir être maintenue de façon continue durant au moins deux heures.
- *Nombre de cycles équivalents complets* : le stockeur doit être capable de réaliser un nombre de cycles équivalents complets annuel supérieur ou égal à 400. Chaque année, le gestionnaire de réseau pourra solliciter le stockage dans la limite de 125% du nombre de cycles équivalents complets annuel. Le nombre de cycles équivalent complet depuis la première année de mise en service doit être inférieur au nombre d'années écoulées fois le nombre de cycles équivalent complet annuel contractuel.

Req-7. Le SSEE ne doit pas avoir de contraintes de charge/décharge sur l'enchaînement des cycles de charges décharges.

Req-8. Lorsque le SSEE en raccordement AC direct a atteint la limite annuelle de nombre de cycles équivalents complets :

- il ne doit plus réaliser les services de report de charge et de réglage primaire de fréquence ;
- il doit continuer à réaliser le service de réglage de la tension.

5.3 Puissance réactive

Req-9. L'installation devra disposer d'un facteur de puissance nominal inférieur ou égal à 0,8.

Req-10. Pour les valeurs de P atteignables, l'installation devra pouvoir fonctionner dans le diagramme PQ ci-dessous sans limite de durée pour une tension à son PDL comprise dans la plage [0,9 pu ; 1,1 pu] et une fréquence du réseau dans la plage [48 Hz ; 52 Hz]

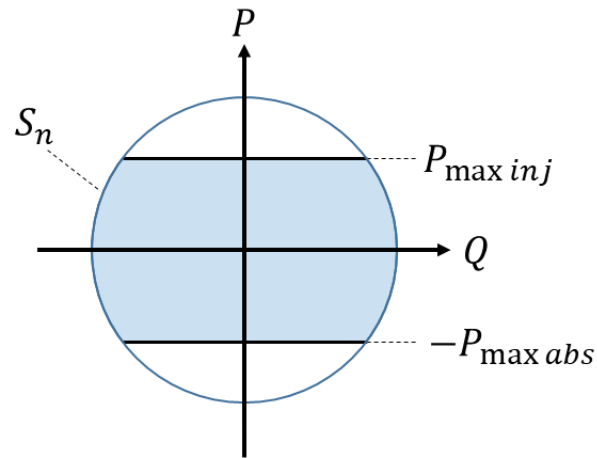


Figure 1 : diagramme PQ de l'installation

Req-11. L'installation doit, si les conditions de fonctionnement du réseau la font sortir de son diagramme PQ, rester connectée au réseau et revenir dans son diagramme PQ pour une tension à son PDL comprise dans la plage [0,9 pu ; 1,1 pu] et une fréquence du réseau dans la plage [48 Hz ; 52 Hz].

6 Pilotage

Note 4. Divers modes de pilotage de l'installation seront réalisés par SEI en fonction de l'état du réseau de transport, notamment :

- « PDL » : un pilotage au PDL privilégié lorsque le réseau de transport est disponible ;
- « Sources » : un pilotage individuel des sources (groupes thermiques, production PV, SSEE, PV + SSEE en DC coupling, etc.) de l'installation lorsque le réseau de transport est indisponible (fonctionnement en réseau séparé du poste source de Margot).

6.1 Exigences générales

Req-12. Le producteur devra fournir à SEI une prévision des indisponibilités des Sources de l'installation sur des pas demi-horaires ainsi qu'une estimation des productions fatales.

Note 5. Les modalités contractuelles liées aux annonces d'indisponibilités et au programme de production seront définies ultérieurement par SEI. Cependant, du fait du caractère stratégique de chacun des sites de production à Puissance Garantie pour la sécurisation de l'alimentation de l'agglomération de St Laurent du Maroni, le GRD devra coordonner les indisponibilités programmées des différents sites à Puissance Garantie en anticipation pour assurer le niveau de Puissance Garantie nécessaire.

Req-13. L'installation devra pouvoir changer de mode de pilotage (notamment basculer entre les modes « PDL » set « Sources ») sans coupure sur réception d'une commande envoyée par SEI.

Req-14. En l'absence de nouvelles commandes de la part de SEI, l'installation devra appliquer les dernières commandes reçues sans limite de durée dans la limite des caractéristiques nominales de l'installation.

Req-15. Le SSEE en raccordement AC direct de l'installation devra pouvoir fonctionner en mode grid following ou en mode grid forming et pouvoir passer de l'un à l'autre sans coupure sur réception d'une commande envoyée par SEI :

- En mode grid following, le SSEE devra se comporter comme une source de courant.
- En mode grid forming, le SSEE devra se comporter, dans la limite de son diagramme PQ, comme une source de tension.

Req-16. L'erreur statique ε_s entre la référence et la mesure de puissance active doit être compatible avec les conditions de pénalisation pour non-respect de la consigne qui seront précisées dans le contrat d'achat.

Req-17. L'erreur statique ε_s doit être $\leq 0,2\% U_{ref}$ pour la régulation de tension et $\leq 1\% Q_{maxinj}$ pour la régulation de puissance réactive.

Note 6. Le format des commandes envoyées par SEI fera l'objet d'une concertation avec le Producteur.

6.2 Pilotage au PDL

Req-18. En mode pilotage au PDL, l'installation devra pouvoir recevoir et appliquer les commandes ci-dessous envoyées par SEI avec une période d'échantillonnage minimale de 1 s :

- Ordres d'arrêt/démarrage individuel pour chaque groupe thermique ;
- Consigne de puissance active au PDL ;
- Choix du mode réglage tension / réglage de la puissance réactive ;
- Consigne de tension au PDL ;
- Consigne de puissance réactive au PDL ;
- Contrainte de stock d'énergie disponible au PDL minimum si l'installation intègre un SSEE en raccordement AC direct ou en DC coupling.

6.3 Pilotage des sources

Req-19. En mode pilotage des sources, l'installation devra pouvoir recevoir et appliquer les commandes ci-dessous envoyées par SEI avec une période d'échantillonnage minimale de 1 s :

- Ordres d'arrêt/démarrage individuel pour chaque groupe thermique ;
- Consigne de puissance active de chaque source pilotable ;
- Consigne de puissance maximale (écrêtement) pour la production PV (fatale) ;
- Choix du mode réglage tension / réglage de la puissance réactive ;
- Consigne de tension au PDL ;
- Consigne de puissance réactive au PDL.

7 Services-système

7.1 Réglage de tension et de la puissance réactive

Req-20. L'installation devra avoir la capacité de participer au réglage de la tension suivant divers modes de réglage, et au minimum les modes décrits ci-dessous :

- Le réglage primaire de la tension ;
- Le réglage de la puissance réactive ;
- Le réglage du tangente Phi ($\tan(\phi)$)

7.1.1 Réglage primaire de la tension

Req-21. L'installation devra disposer d'un réglage de tension avec une référence U_{ref} calculée de la façon suivante :

$$U_{ref} = U_{cons} + \Delta U_{ref}$$

Avec :

- U_{cons} : la consigne de tension de l'installation transmise par SEI
- ΔU_{ref} : le complément de référence de tension

Req-22. L'installation calculera le complément de référence de tension ΔU_{ref} suivant la loi de réglage ci-dessous :

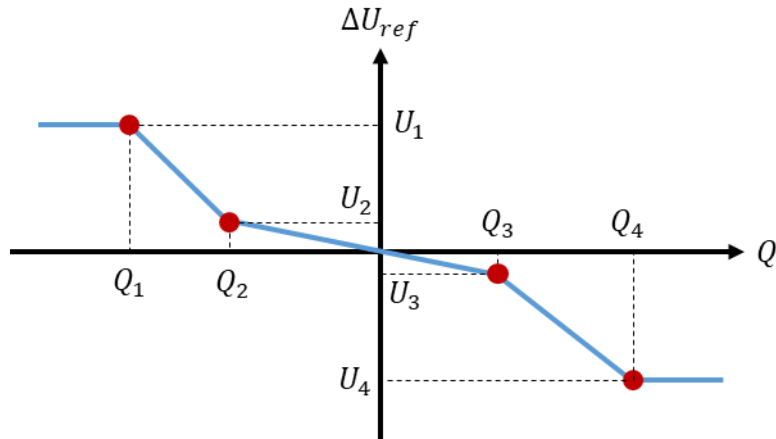


Figure-2 Caractéristique U(Q) de l'installation pour le réglage primaire de tension

Avec :

- ΔU_{ref} : le complément de référence de tension de l'installation
- Q : la puissance réactive injectée par l'installation
- $Q_1-U_1, Q_2-U_2, Q_3-U_3$ et Q_4-U_4 : les points de la caractéristiques U(Q) de l'installation

Req-23. Les paramètres de calcul du complément de référence de tension ΔU_{ref} devront pouvoir être modifiés sur demande de SEI.

7.1.2 Réglage de la puissance réactive

Req-24. L'installation devra disposer d'un réglage de la puissance réactive avec une référence Q_{ref} calculée de la façon suivante :

$$Q_{ref} = Q_{cons} + \Delta Q_{ref}$$

Avec :

- Q_{cons} : la consigne de puissance réactive de l'installation transmise par SEI
- ΔQ_{ref} : le complément de référence de puissance réactive

Req-25. L'installation calculera le complément de référence de tension ΔQ_{ref} suivant la loi de réglage ci-dessous :

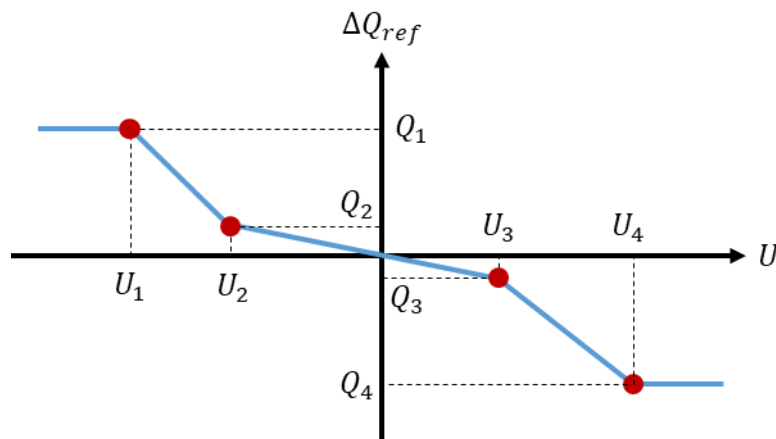


Figure-3 Caractéristique Q(U) de l'installation pour le réglage de puissance réactive

Avec :

- ΔQ_{ref} : le complément de référence de puissance réactive de l'installation
- U : la tension de l'installation
- $Q_1-U_1, Q_2-U_2, Q_3-U_3$ et Q_4-U_4 : les points de la caractéristiques Q(U) de l'installation

Req-26. Les paramètres de calcul du complément de référence de tension ΔQ_{ref} devront pouvoir être modifiés sur demande de SEI tout au long de la durée de vie de l'installation car les besoins pourront évoluer avec le développement de la zone et des projets l'accompagnant.

7.1.3 Performances dynamiques

Req-27. La réponse dynamique de la tension, ou de la puissance réactive selon le mode de réglage actif, de l'installation à une variation sous forme d'échelon positif ou négatif de la tension du PDL, tant que l'installation fonctionne hors limitation de son diagramme PQ, devra pouvoir être paramétrée et modifiée sur demande de SEI sur les plages suivantes :

- Dépassement maximal $D_{max} : \leq 10\%$;
- Temps de réponse à 5% $t_{r5\%} : [1 \text{ s} ; 10 \text{ s}]$.

D_{max} et T_r sont définis en annexe.

7.2 Réglage primaire de fréquence

7.2.1 Groupes thermiques

Req-28. Les groupes de production thermiques doivent respecter la SEI REF 01 section 3.3 « capacités constructives en réglage de fréquence » avec pour modifications suivantes :

- La valeur de « 10 % » qui caractérise la « réserve primaire, R_p » est remplacée par la valeur de « 25 % ».

Req-29. Les paramètres des régulateurs doivent pouvoir être modifiés à la demande de SEI, notamment pour réduire la dynamique de réponse par rapport aux critères spécifiés dans la SEI REF 01 si nécessaire.

Req-30. Les groupes thermiques de l'installation doivent disposer d'une constante d'inertie maximale et si possible supérieure à 1 MWs/MVA.

7.2.2 SSEE en raccordement AC direct en grid forming

Req-31. Le SSEE devra disposer d'un réglage de la puissance active avec une référence P_{ref} calculée de la façon suivante :

$$P_{ref} = P_{cons} + P_{f1}$$

Avec P_{cons} la consigne de puissance active du SSEE côté BT.

Req-32. La caractéristique du réglage primaire de fréquence du SSEE en mode grid forming liant la fréquence et P_{f1} devra être la suivante :

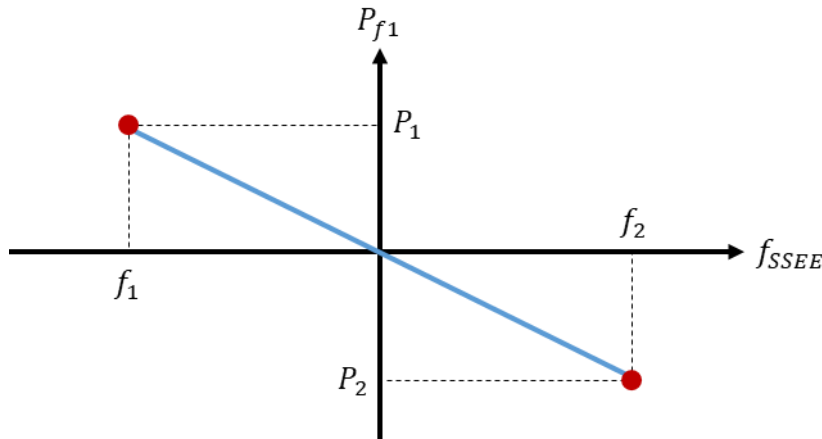


Figure-4 Caractéristique du réglage primaire de fréquence en mode grid forming

Avec :

- P_{f1} : la puissance active pour le réglage primaire de fréquence
- f : la fréquence électrique du SSEE
- f_1, f_2, P_1, P_2 : les points de la caractéristique $P(f)$

Req-33. Les paramètres de la caractéristique $P_{f1}(f)$ devront pouvoir être modifiés sur demande de SEI.

Req-34. La réponse dynamique de la puissance active des onduleurs de tension des SSEE à un échelon positif ou négatif de consigne de puissance active, tant que l'installation fonctionne dans la limite de son diagramme PQ, devra pouvoir être paramétrée et modifiée sur demande de SEI sur les plages suivantes :

- Dépassement maximal $D_{max} : \leq 5\%$;
- Temps de réponse à 5% $t_{r5\%} : [\leq 1 \text{ s} ; 10 \text{ s}]$.

Req-35. Lorsque le SSEE atteint sa limite d'injection de puissance active, il devra :

- Rester synchrone avec le réseau à tout instant (algorithme de partage de la puissance active activé) ;
- Baisser progressivement sa fréquence électrique soit :
 - jusqu'à la sortie de la limite d'injection de puissance active du SSEE ou à l'activation de sa protection de découplage ;
 - jusqu'à une valeur paramétrable supérieure ou égale à 44 Hz en moins de 200 ms et l'y maintenir.

Req-36. Lorsque le SSEE atteint sa limite d'absorption de puissance active, il devra :

- Rester synchrone avec le réseau à tout instant (algorithme de partage de la puissance active activé) ;
- Augmenter progressivement sa fréquence électrique soit :
 - jusqu'à la sortie de la limite d'absorption de puissance active du SSEE ou à l'activation de sa protection de découplage ;
 - jusqu'à une valeur paramétrable inférieure ou égale à 54 Hz en moins de 200 ms et l'y maintenir.

Req-37. Les seuils de fréquence et les temps de réaction présents dans cette section devront pouvoir être modifiés à la demande de SEI pendant toute la durée du contrat (dans le respect des valeurs extrémales données ci-dessus).

7.2.3 SSEE en raccordement AC direct en grid following

Req-38. Le SSEE devra disposer d'un réglage de la puissance active avec une référence P_{ref} calculée de la façon suivante :

$$P_{ref} = P_{cons} + P_{f1}$$

Avec P_{cons} la consigne de puissance active du SSEE côté BT.

Req-39. La caractéristique du réglage primaire de fréquence du SSEE en mode grid following liant la fréquence et P_{f1} devra être la suivante au point de raccordement de leurs onduleurs de tension :

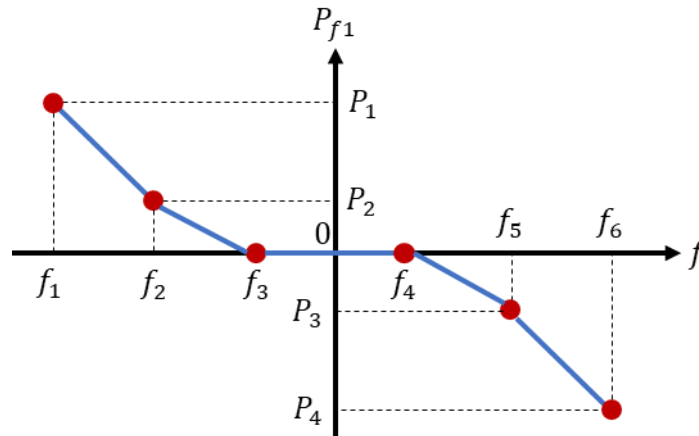


Figure-5 Caractéristique du réglage primaire de fréquence de l'installation

Avec :

- P_{f1} : la puissance active pour le réglage primaire de fréquence
- f : la fréquence électrique
- $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, P_1, P_2, P_3, P_4$: les points de la caractéristique $P(f)$

Req-40. Les paramètres de la caractéristique $P_{f1}(f)$ devront pouvoir être modifiés sur demande de SEI pendant toute la durée du contrat.

Req-41. La réponse dynamique de la puissance active des onduleurs de tension des SSEE à une variation sous forme d'échelon positif ou négatif de la fréquence du réseau, tant que l'installation fonctionne dans la limite de son diagramme PQ, devra pouvoir être paramétrée et modifiée sur demande de SEI sur les plages suivantes :

- Dépassement maximal $D_{max} : \leq 10\%$;
- Temps de réponse à 5% $t_{r5\%} : [\leq 0,25 \text{ s} ; 1 \text{ s}]$.

7.2.4 Production PV en raccordement AC direct

Req-42. Le producteur devra avoir capacité d'écarter automatiquement la puissance active de sa production PV en cas de surfréquence du système suivant la loi de réglage suivante :

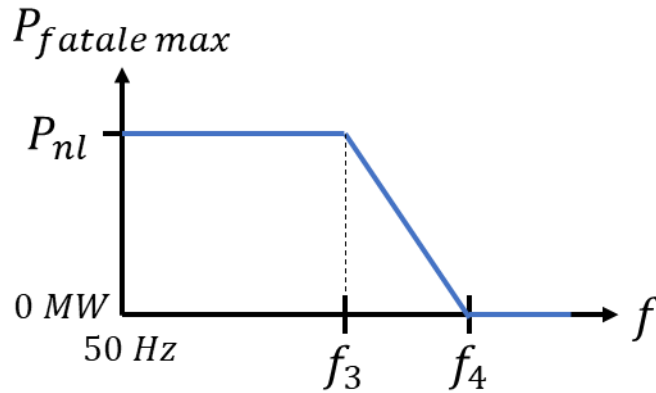


Figure-6 Caractéristique d'écarterement automatique de la production PV sur surfréquence

Avec :

- $P_{fatale\ max}$: la puissance active maximale autorisée pour la production PV de l'installation
- P_{nl} : la puissance active non-limitée, peut correspondre soit à la puissance active produite précédant le dépassement de f_1 , soit à la puissance crête de la production PV selon la solution du soumissionnaire
- f : la fréquence électrique du système électrique
- $f_3 \in [50\ Hz ; 50,5\ Hz]$
- $f_4 \in [51\ Hz ; 52\ Hz]$

Req-43. Le choix des seuils f_3 et f_4 devra pouvoir être paramétré et modifié sur demande de SEI.

Req-44. Si une commande d'écarterement de la production PV émise par SEI est en cours d'application, celle-ci devra être automatiquement arrêtée en cas de sous-fréquence du système suivant la loi de réglage suivante :

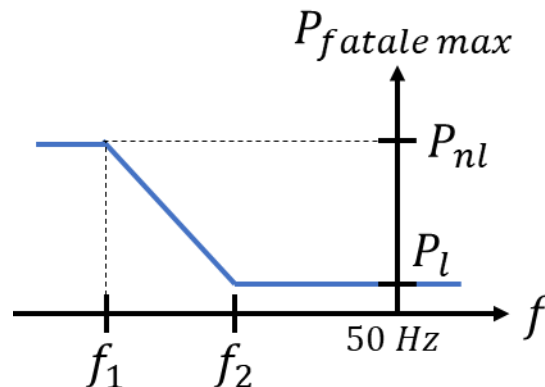


Figure-7 Caractéristique d'arrêt automatique de l'écarterement de la production PV sur sous-fréquence

Avec :

- $P_{fatale\ max}$: la puissance active maximale autorisée pour les moyens de production fatale de l'installation
- P_{nl} : puissance active non-limitée, correspond à la puissance crête des moyens de production fatale
- P_l : puissance active limitée = puissance active maximale autorisée par la consigne d'écrêtement de SEI
- f : la fréquence électrique du système électrique
- $f_1 \in [49\ Hz ; 49,5\ Hz]$
- $f_2 \in [49,5\ Hz ; 50\ Hz]$

Req-45. Le choix des seuils f_1 et f_2 devra pouvoir être paramétré et modifié sur demande de SEI.

Req-46. La réponse dynamique de la puissance active des moyens de production fatale de l'installation à une variation sous forme d'échelon positif ou négatif de la fréquence du réseau devra pouvoir être paramétrée et modifiée sur demande de SEI sur les plages suivantes :

- Dépassement maximal $D_{max} : \leq 10\%$.
- Temps de réponse à 5% $t_{r5\%} : [\leq 0,5\ s ; 5\ s]$.

7.2.5 SSEE + PV en DC couplage en grid following

Req-47. Le SSEE + PV en DC couplage devra disposer d'un réglage de la puissance active avec une référence P_{ref} calculée de la façon suivante :

$$P_{ref} = P_{cons} + P_{f1}$$

Avec P_{cons} la consigne de puissance active du SSEE côté BT.

Req-48. La caractéristique du réglage primaire de fréquence du SSEE + PV en DC couplage en mode grid following liant la fréquence et P_{f1} devra être la suivante au point de raccordement de leurs onduleurs de tension :

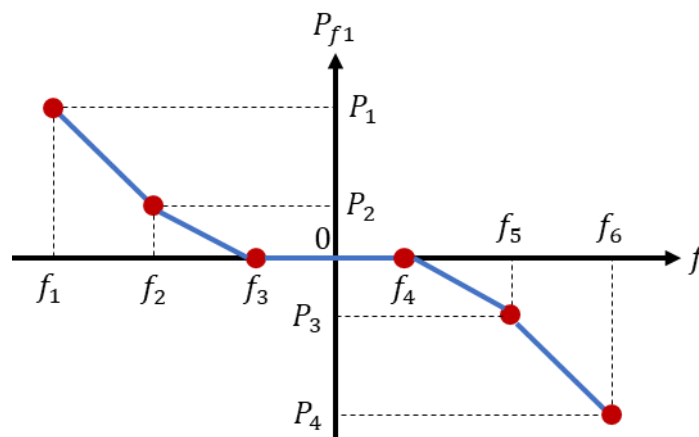


Figure-8 Caractéristique du réglage primaire de fréquence de l'installation

Avec :

- P_{f1} : la puissance active pour le réglage primaire de fréquence
- f : la fréquence électrique
- $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, P_1, P_2, P_3, P_4$: les points de la caractéristique P(f)

Req-49. Les paramètres de la caractéristique $P_{f1}(f)$ devront pouvoir être modifiés sur demande de SEI pendant toute la durée du contrat.

Req-50. La réponse dynamique de la puissance active des onduleurs de tension des SSEE + PV en DC couplage à une variation sous forme d'échelon positif ou négatif de la fréquence du réseau, tant que l'installation fonctionne dans la limite de son diagramme PQ, devra pouvoir être paramétrée et modifiée sur demande de SEI sur les plages suivantes :

- Dépassement maximal $D_{max} : \leq 10\%$;
- Temps de réponse à 5% $t_{r5\%} : [\leq 1 \text{ s}]$.

7.3 Blackstart et renvoi de tension

Req-51. En l'absence de tension au PDL, et pour un état initial de l'installation découplée du réseau, l'installation devra être capable de réalimenter le réseau à la demande de SEI conformément aux exigences de la présente section.

Req-52. Pour un état initial de l'installation à l'arrêt et découplée du réseau, l'installation devra être capable, à la réception d'une consigne de blackstart envoyée par SEI, de démarrer de manière autonome sans alimentation externe, et ainsi fonctionner en mode îloté permettant d'alimenter ses auxiliaires.

Req-53. A la réception d'une consigne de renvoi de tension envoyée par SEI, l'installation devra appliquer la séquence suivante :

- Amener sa tension au PDL à une valeur $< 0,05 \text{ pu}$;
- Fermer l'organe de coupure au PDL le séparant du réseau de distribution ;
- Initier une rampe de tension.

Req-54. La rampe de tension de l'installation devra permettre d'atteindre au PDL une tension de 0,9 pu avec une durée paramétrable par SEI entre 0 seconde (rampe désactivée) et 10 secondes avec une résolution de 0,1 seconde.

Req-55. Lorsque la tension de 0,9 pu est atteinte au PDL, l'installation devra être en mesure de fonctionner pleinement conformément aux critères de fonctionnement normal de la convention de raccordement.

Req-56. Quel que soit l'état initial de l'installation, elle devra être capable de délivrer une puissance supérieure ou égale à sa Puissance Garantie dans un temps entre la réception de la consigne de blackstart et la fin de la séquence de renvoi de tension inférieur à :

- 3 min, si elle comporte un SSEE en raccordement AC direct en grid forming ou des GE qui en ont la capacité constructive ;
- 15 min sinon.

8 Tenue aux variations normales et exceptionnelles de la tension et de la fréquence

8.1 Variations normales et exceptionnelles de la tension d'exploitation

Req-57. L'installation devra avoir la capacité de rester couplée au réseau et de fonctionner conformément à son mode de réglage de la tension / puissance réactive et de puissance active dans la limite de son diagramme PQ dans les conditions suivantes de tension :

Plage de tension	Condition d'opération
[0,8 pu – 0,9 pu]	≥ 5 minutes
[0,9 pu – 1,1 pu]	Illimité
[1,1 pu – 1,174 pu]	≥ 5 minutes

Tableau-1 Tenue aux variations de tension

8.2 Variations normales et exceptionnelles de la fréquence d'exploitation

Req-58. L'installation devra avoir la capacité de rester couplée au réseau et de fonctionner conformément à son mode de réglage de la tension / puissance réactive et de puissance active dans la limite de son diagramme PQ dans les conditions suivantes de fréquence :

Plage de fréquence	Condition d'opération
< 44 Hz	≥ 0,4 secondes
[44 Hz ; 47 Hz]	≥ 60 secondes
[47 Hz ; 48 Hz]	≥ 3 minutes
[48 Hz ; 52 Hz]	Illimité
> 52 Hz	> 5 s

Tableau-2 Tenue aux variations de fréquence

Note 7. La durée minimale de tenue de fréquence est indépendante sur chacune des plages.

9 Tenue aux perturbations

Note 8. Les seuils et temporisations de ce chapitre ne correspondent pas au réglage des protections de découplage de l'installation. Ces réglages seront fournis dans les conventions de raccordement et d'exploitation.

9.1 Exigences pour le SSEE et la production PV

9.1.1 Tenue au ROCOF – (rate of change of frequency)

Req-59. Le SSEE et la production PV en raccordement AC direct ou en DC coupling devront avoir la capacité de rester couplés au réseau et de fonctionner à leur capacité maximale de puissance active et réactive sans limite de durée pour toute valeur de ROCOF.

9.1.2 Tenue aux creux de tensions

Req-60. Le SSEE et la production PV en raccordement AC direct ou en DC coupling devront avoir la capacité de rester couplés au réseau et de fonctionner conformément aux exigences du présent cahier des charges tant que la composante directe de la tension au PDL reste supérieure ou égale à celle définie dans la courbe tension-temps ci-dessous.

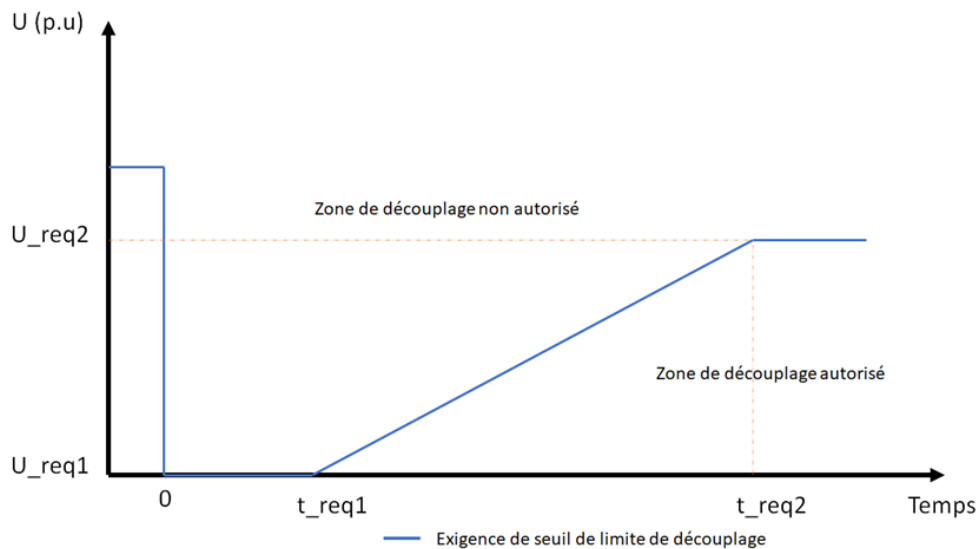


Figure-9 Capacité de tenue aux creux de tension-Courbe temps/tension

Les valeurs caractéristiques de la courbe sont données ci-dessous :

Seuil de tension / Délai temporel	Valeur
U_req1	0 pu
U_req2	0,8 pu
T_req1	1 seconde
T_req2	3 secondes

Tableau-3 Valeurs caractéristiques de la courbe temps/tension de tenue aux creux de tension

Req-61. L'installation doit retrouver en moins de 100 ms un niveau de production de puissance active à +/- 10% de la puissance active produite avant le creux lorsque la tension au point de livraison revient au-dessus de 0.85 (+0/-0,1) Un.

9.1.3 Tenue aux pics de tensions

Req-62. Le SSEE et la production PV en raccordement AC direct ou en DC coupling devront avoir la capacité de rester couplé au réseau et de fonctionner tant que la tension phase – phase la plus élevée au PDL n'excède pas la courbe tension-temps ci-dessous.

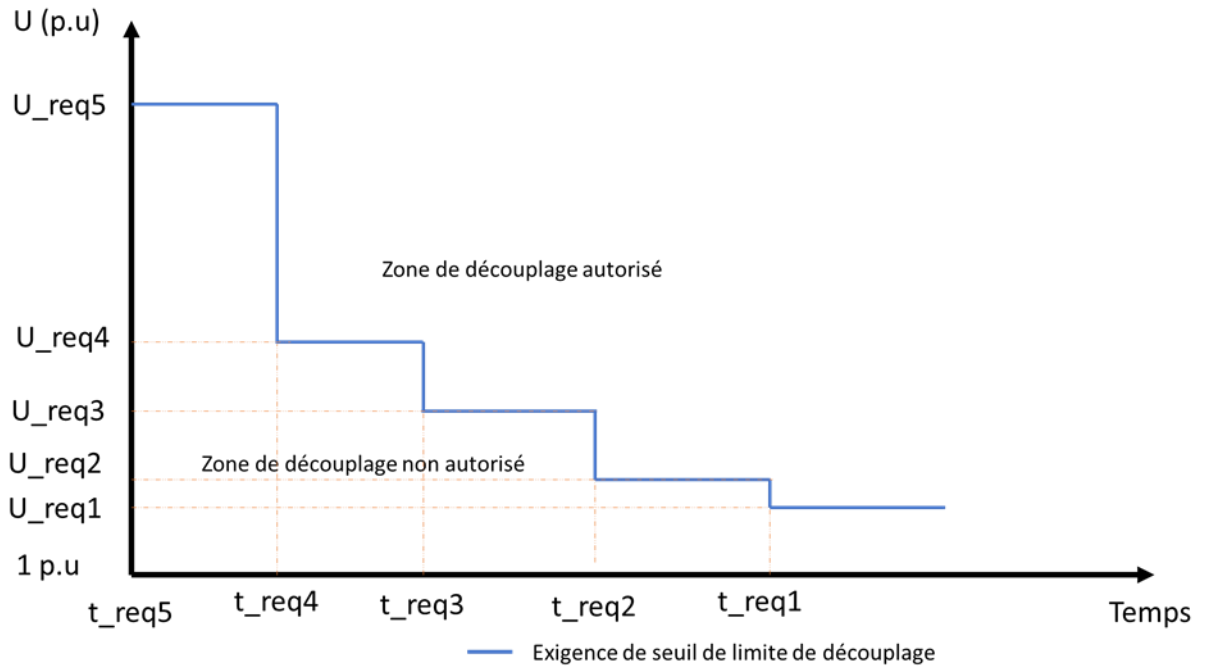


Figure-10 Capacité de tenue aux pics de tension-Courbe temps/tension

Les valeurs caractéristiques de la courbe sont données ci-dessous :

Seuil de tension / Délai temporel	Valeur
U_{req1}	1.1 pu
U_{req2}	1.15 pu
U_{req3}	1.2 pu
T_{req1}	300 secondes
T_{req2}	1 secondes
T_{req3}	0.1 secondes

Tableau-4 Valeurs caractéristiques de la courbe temps/tension de la capacité à la tenue des pics de tension

9.2 Injection et absorption de courant de défaut

9.2.1 Courant de défaut

Req-63. Le SSEE en raccordement AC direct de l'installation devra, lors d'un transitoire de tension, pouvoir injecter ou absorber un courant I_{cc} supérieur ou égal à $2 I_n$ au PDL de l'installation pour chacune des phases impactées pendant une durée supérieure ou égale à 1 s.

Req-64. La production PV en raccordement AC direct de l'installation devra, lors d'un transitoire de tension, pouvoir injecter ou absorber un courant I_{cc} supérieur ou égal à I_n au PDL de l'installation pour chacune des phases impactées pendant une durée supérieure ou égale à 1 s.

Req-65. Le SSEE + PV en DC coupling de l'installation devra, lors d'un transitoire de tension, pouvoir injecter ou absorber un courant I_{cc} supérieur ou égal à $1,25 I_n$ au PDL de l'installation pour chacune des phases impactées pendant une durée supérieure ou égale à 1 s de sorte à pouvoir maintenir sa puissance active à sa valeur $P_{max inj}$ pour une tension supérieure ou égale à 0,8 pu.

Req-66. Les moyens de production thermique devront pouvoir fournir un courant de défaut I_{cc} supérieur ou égal à $3 I_n$ pendant 1 s.

Req-67. L'installation ne devra pas, lors d'un transitoire de tension, injecter ou absorber un courant de défaut I_{cc} supérieur à 20 kA pour chacune des phases en défaut pendant une durée supérieure ou égale à 1 s. Cette valeur de I_{cc} max devra pouvoir être modifiée à la baisse si des contraintes de courant de court-circuit maximaux sont observées sur le réseau.

9.2.2 SSEE grid following et PV en raccordement AC direct ou DC coupling

Req-68. Le SSEE en raccordement AC direct en mode grid following, la production PV en raccordement AC direct et le SSEE + PV en DC coupling devront respecter les exigences de la norme CENELEC « CLC/TS 50549-2 » suivantes :

- Section 4.7.4.1.1 Voltage support during faults and voltage steps ;
- Section 4.7.4.1.2 Zero current mode for converter connected generating technology.

Req-69. Le paramétrage du Fault Ride Through du SSEE en raccordement AC direct ou du SSEE + PV en DC coupling devra pouvoir être modifié à la demande de SEI pendant toute la durée du contrat.

9.2.3 SSEE en raccordement AC direct en grid forming

Req-70. Le SSEE en mode grid forming devra fournir ou absorber pour chaque phase le courant nécessaire pour maintenir sa tension AC à sa référence dans la limite de I_{max} .

Req-71. La limitation de courant AC doit être fait par modification des références de courant AC dans le contrôle-commande des onduleurs

Req-72. Le temps de réponse à 5% $t_{r5\%}$ des courants doit inférieur à 60 ms.

10 Qualité de la tension

Req-73. L'installation devra respecter la SEI REF 02 section 3.8 « Perturbations de la qualité de l'onde de tension ».

11 Manœuvres

11.1 Couplage à un réseau sous tension

Req-74. L'installation devra avoir la capacité de se synchro-coupler au réseau de distribution via la fermeture d'un organe de coupure appartenant à l'installation au niveau du PDL.

11.2 Îlotage de l'installation en vue d'un recouplage rapide au réseau EDF sous tension

Note 9. L'îlotage décrit dans cette section concerne l'installation. Il est défini comme étant le fonctionnement dans lequel l'installation est sous tension avec son disjoncteur PDL ouvert.

Req-75. A la réception de la consigne d'îlotage ou à la suite du déclenchement de sa protection de découplage, l'installation devra se découpler du réseau de distribution au PDL via l'ouverture de l'organe de couplage au réseau de l'installation.

Note 10. Le producteur est uniquement tenu d'appliquer la consigne d'îlotage d'EDF :

- si au moins un de ces GE est connecté,
- ou si son SSEE en raccordement AC direct et piloté en mode grid forming est connecté, sous réserve que son stock d'énergie le permette.

Req-76. A l'issue du découplage, l'installation devra rester sous tension, alimenter ses auxiliaires et être prête à se recoupler au réseau de distribution à la réception d'une autorisation de couplage. Cet état est appelé « îlotage ».

Req-77. L'installation devra avoir la capacité de se maintenir en état d'îlotage pendant une durée de 60 minutes minimum.

Req-78. A partir de l'état d'îlotage, l'installation devra avoir la capacité de se synchro-coupler au réseau de distribution dans un délai inférieur ou égal à 1 min après l'envoi de l'autorisation de couplage.

11.3 Découplage des sources du réseau

Req-79. A réception d'une consigne de découplage des sources, l'installation devra séparer toutes les sources internes de l'installation du réseau dans un délai inférieur ou égal à 1 min.

Req-80. A réception d'une autorisation de couplage, l'installation devra être capable de synchro-coupler ses sources au réseau et d'atteindre une puissance supérieure ou égale à sa Puissance Garantie dans un délai inférieur à :

- 3 min, si elle comporte un SSEE grid forming ;
- 15 min sinon.

11.4 Energisation de l'installation par le réseau

Req-81. Les transformateurs de l'installation devront pouvoir être connectés puis alimentés par le réseau sans aucun dispositif de synchronisation sur l'organe de coupure AC.

Note 11. En règle générale, l'installation devra énergiser elle-même ses transformateurs, mais il doit également être possible d'énergiser les transformateurs depuis le réseau.

12 Téléinformations

Req-82. L'installation devra remonter au SCADA de SEI un certain nombre d'informations pour le pilotage temps réel. La liste définitive ainsi que les valeurs de précision, unité, et rafraichissement seront définies ultérieurement par SEI. A titre indicative, les données présentées dans le tableau ci-dessous pourront être demandées a priori :

Information	Libellé	Précision	Unité	Type de signal	Rafraichissement
Données	Tension au PDL	0,001 pu	kV	Mesure	≤1 seconde
	Courant au PDL	0,01 pu	A	Mesure	
	Puissance active injectée/absorbée au PDL et en sortie des sources	0,1 pu	MW	Mesure	
	Puissance réactive injectée/absorbée au PDL et en sortie des sources	0,1 pu	MVA	Mesure	
	Fréquence électrique au PDL et des sources	0,001 pu	Hz	Mesure	
	SOC du SSEE	0,01 pu	%	Mesure	
Etat des sources	Connecté ;	-	-	Logique	
	Déconnectée mais disponible pour la connexion ;	-	-	Logique	
	Déconnectée et non disponible pour la connexion ;	-	-	Logique	
Mode de pilotage du SSEE	Grid Forming ;	-	-	Logique	
	Grid Following	-	-	Logique	
Paramètres des services systèmes des sources	Lois de régulation ;	0,001 pu	-	Paramètre	
	Paramètres de limitation	0,001 pu	-	Paramètre	
	Valeurs de consigne interne en puissance active, puissance réactive et tension ;	0,01 pu	Unités de mesure	Paramètre	
Téléformations relatives au comptage et à la protection	Etat du disjoncteur de couplage (ouvert/fermé/défaillant) ;	-	-	Logique	
Listes d'alarmes	Indisponibilités voies de transmission 1 et/ou 2 Astreinte Producteur en télé-opération si voies Modes dégradés installation (auxiliaires, ...)			1(&2) Logique TI à définir	

Tableau-5 Informations minimales remontées par l'installation pour le pilotage temps réel

Req-83. L'installation devra mettre à disposition SEI les informations minimales suivantes, complémentaires aux informations utilisées pour le pilotage temps réel, pour le suivi du contrat :

Information	Libellé	Format	Unité	Type de signal	Rafraichissement
Energie du SSEE	Energie déchargée depuis le début de l'année contractuelle	0,01 pu	MWh	Calcul	à définir
	Energie chargée depuis le début de l'année contractuelle	0,01 pu	MWh	Calcul	

Rendement du SSEE	100 * (Energie déchargée depuis le début de l'année contractuelle / Energie chargée depuis le début de l'année contractuelle)	0,01 pu	%	Calcul	
Disponibilité des sources	Disponibilité depuis le début de l'année contractuelle	0,01 pu	%	Calcul	

Tableau-6 Informations minimales remontées par l'installation pour le suivi du contrat

Note 12. Ces tableaux feront l'objet d'échanges spécifiques entre le Producteur et SEI et pourront être modifiés afin de permettre le raccordement de l'installation au réseau.

Req-84. Le système de communication avec le SCADA de SEI devra être compatible avec les protocoles de communication définis dans les normes IEC 60870-5-104 et IEC 61850. Les modalités d'échange des informations contractuelles seront définies ultérieurement.

Req-85. Les automates de télécommunication du SSEE devront avoir la capacité de communiquer via fibre optique avec le SCADA de SEI.

Note 13. La fibre optique sera provisionnée par SEI jusqu'au PDL.

Req-86. D'une manière générale, l'installation devra assurer une interopérabilité entre son installation et les automates de télécommunication mises en œuvre par SEI.

Req-87. L'installation devra être en mesure de mémoriser en interne un historique des données et paramètres. La liste précise des données, leur granularité, précision, et la durée de stockage seront définies ultérieurement par SEI.

13 Modèles numériques

13.1 Modèles PowerFactory

Req-88. Le Producteur devra fournir deux modèles de l'installation compatibles et validés. La version à privilégier sera spécifiée par SEI préalablement à la fourniture des modèles, et sera non-antérieure à 2020 SP2A :

- Un modèle représentatif de l'installation pour les modes de simulation dynamique RMS équilibré et RMS déséquilibré ;
- Un modèle représentatif de l'installation pour le mode de simulation dynamique instantané (EMT) ;
- La partie contrôle-commande sous forme DSL de ces modèles peut être cryptée ;

Req-89. Chaque modèle devra être représentatif de l'installation :

- Hors limitation ;
- En limitation, incluant mais non-limitées aux limitations de courant AC et de puissance active.

Req-90. Chaque modèle devra être compatible avec les modes de simulation suivants :

- Load flow / Quasi-dynamique / Contingence ;
- Calcul de courant de court-circuit (méthode complète) ;
- Qualité de l'énergie (harmoniques et flicker) ;

Req-91. Chaque modèle devra permettre de simuler les phases de mise sous tension, couplage au réseau, découplage du réseau, mise hors tension.

Req-92. Chaque modèle devra être initialisé de façon à éviter tout transitoire préalable à l'application d'évènements de simulation.

Req-93. Chaque modèle devra être fourni avec le set de paramètres du solveur de PowerFactory pour les simulations dynamiques permettant d'obtenir le meilleur compromis entre la précision des résultats et la durée des simulations.

Req-94. Le soumissionnaire devra indiquer pour chaque modèle son domaine de validité, c'est-à-dire les plages de fonctionnement des grandeurs physiques ainsi que les types d'évènement pour lesquels chaque modèle est invalide.

Req-95. Chaque paramètre de chaque modèle exerçant une influence sur les performances du SSEE spécifiées dans ce cahier des charges devra être modifiable par SEI.

13.2 Manuel utilisateur

Req-96. Le Producteur devra fournir un manuel utilisateur contenant pour chaque modèle :

- Le synoptique de la partie puissance de l'installation, détaillant l'ensemble des sources ;
- Les synoptiques détaillés des fonctions de contrôle-commande chaque source de l'installation ainsi que les fonctions de contrôle-commande coordonnées permettant d'analyser les résultats de simulation obtenus, incluant mais non-limités aux algorithmes ci-dessous :
 - Régulation de courant AC ;
 - Limitation de courant AC ;
 - Régulation de tension AC et/ou de puissance réactive ;
 - Limitation de la puissance réactive et/ou de la puissance apparente ;
 - Régulation de la puissance active et/ou de la fréquence électrique ;

- Limitation de la puissance active ;
- Algorithme de synchronisation au réseau ;
- Régulation de la tension DC ;
- Limitation de la tension DC ;
- La liste, l'emplacement, le fonctionnement et le paramétrage des protections, incluant mais non-limitée à la protection de découplage au PDL ;
- Les domaines de validité des modèles.

13.3 Mise à jour des modèles et du manuel utilisateur

Req-97. Suite aux essais de mise en service, le Producteur devra fournir à SEI un dossier de comparaison entre les résultats des essais et les résultats des simulations réalisées avec les modèles fournis dans des conditions simulées représentatives des essais.

Req-98. Le Producteur devra, en cas d'écart significatif constaté par SEI entre le comportement des modèles et le comportement du SSEE lors des essais de mise en service, réaliser une mise en conformité des modèles et la mise à jour du manuel utilisateur.

14 Etudes et essais préalables à la mise en service

14.1 Etudes

Req-99. Le soumissionnaire devra fournir un rapport de simulation comportant les résultats des simulations du charges des études dynamiques, annexé à la convention de raccordement.

Note 14. A titre informatif, le soumissionnaire pourra prendre connaissance des simulations demandées dans l'annexe du SEI REF 01.

Req-100. SEI réalisera une étude d'intégration au réseau de l'installation en utilisant les modèles numériques fournis par le soumissionnaire (cf. chapitre 13). Si l'étude met en avant un comportement de l'installation impactant négativement le fonctionnement du réseau, SEI pourra demander au soumissionnaire d'adapter le fonctionnement de l'installation ; à défaut SEI pourra refuser le raccordement de l'installation.

14.2 Essais

Req-101. Le soumissionnaire réalisera à ses frais le Programme d'Essais Site, annexe au présent cahier des charges. Si le comportement de l'installation n'est pas conforme aux critères de validation des essais, SEI pourra demander au soumissionnaire de mettre son installation en conformité ; à défaut SEI pourra refuser le raccordement de l'installation.

Req-102. Chaque régulateur de l'installation doit disposer d'une entrée analogique externe pour réaliser des essais de performances avec un délai de traitement (retard d'application des commandes) de cette entrée inférieur ou égal à 100 ms et un temps de réponse $t_{r5\%}$ de l'entrée inférieur ou égal à 10 ms.

Note 15. A titre informatif, le soumissionnaire pourra prendre connaissance des procédures d'essais avant mise en service décrites dans la SEI REF 08.

15 ANNEXE : Performances dynamiques - définitions

15.1.1 Réponse à un échelon

Les performances dynamiques de la réponse à un échelon de la référence ou de la mesure de la variable pilotée sont définies dans la présente section.

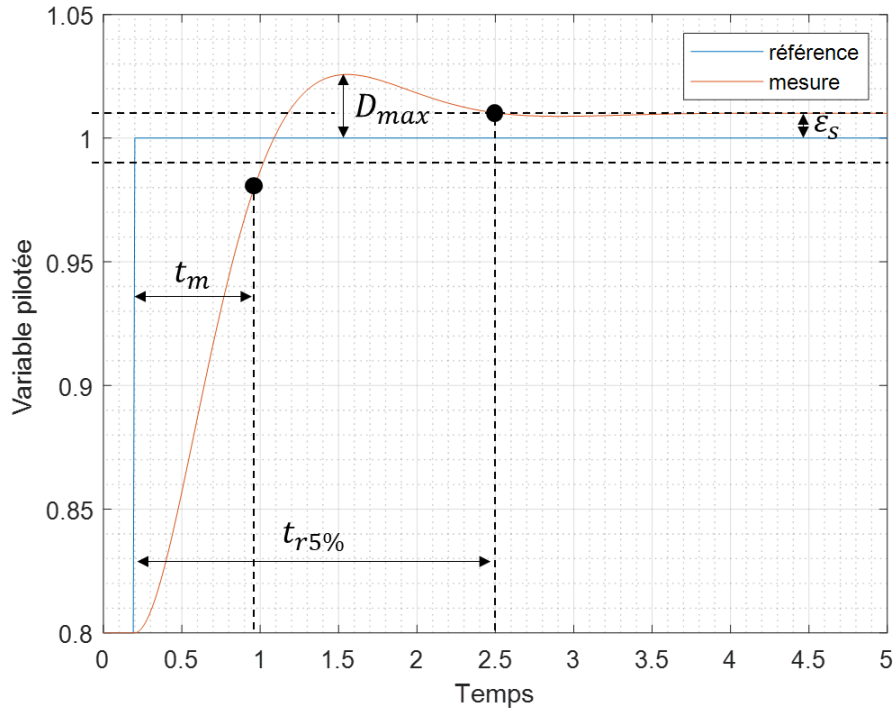


Figure-11 Définition des performances dynamiques de la réponse à un échelon

- **Erreur statique ε_s**

Elle correspond à l'écart entre les valeurs finales de la référence et de la mesure de la variable pilotée.

Elle peut être exprimée dans l'unité de la variable pilotée :

$$\varepsilon_s = \text{référence}_f - \text{mesure}_f$$

Ou en pourcentage de la référence :

$$\varepsilon_s = 100 \times \frac{\text{référence}_f - \text{mesure}_f}{\text{référence}_f}$$

Avec :

- référence_f : la valeur finale de la référence
- mesure_f : la valeur finale de la mesure

- **Dépassement maximal D_{max}**

Le dépassement maximal est la valeur maximale prise par la mesure lors de la réponse à l'échelon.

Il peut être exprimé dans l'unité de la variable pilotée :

$$D_{max} = \max(|\text{mesure} - \text{mesure}_i|)$$

Ou en pourcentage de la valeur finale de l'échelon de référence :

$$D_{max} = 100 \times \frac{\max(|mesure - mesure_i|)}{référence_f - référence_i}$$

Avec :

- $référence_i$: valeur initiale de la référence
- $mesure_i$: valeur initiale de la mesure
- **Temps de réponse à 5% $t_{r5\%}$**

Le temps de réponse à 5% est la différence entre l'instant où la mesure de la variable pilotée, à laquelle on retranche sa valeur pré-échelon, reste dans une plage $\pm 5\%$ de sa référence à laquelle on retranche également sa valeur pré-échelon et l'instant de l'échelon.

- **Temps de montée t_m**

Le temps de montée est la différence entre l'instant où la mesure de la variable pilotée atteint 90% de sa valeur finale et l'instant de l'échelon.

15.1.2 Réponse à une rampe

Les performances dynamiques de la réponse à une rampe de la référence de la variable pilotée sont définies dans la présente section.

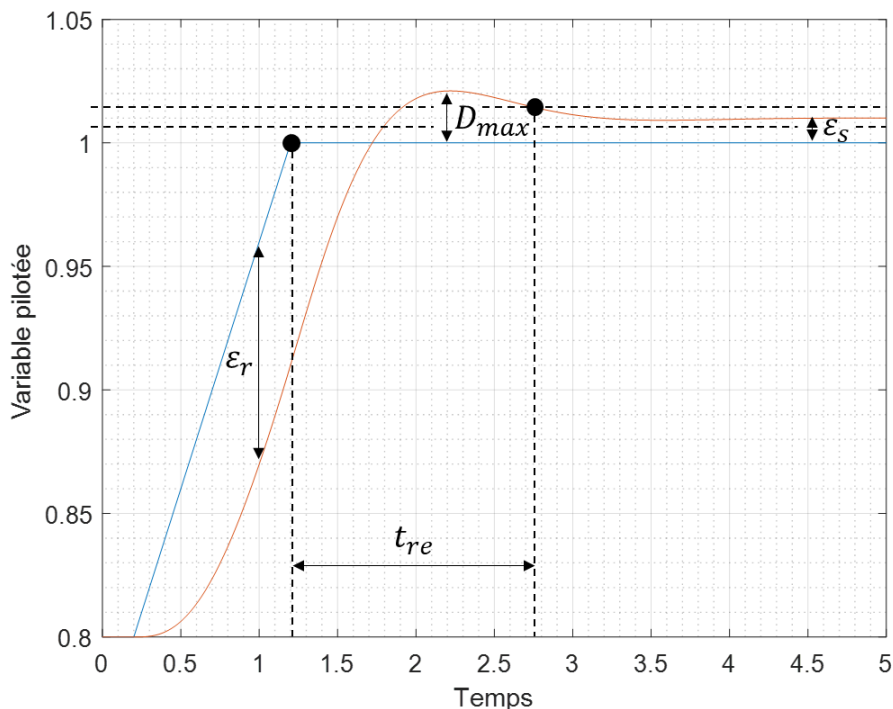


Figure-12 Définition des performances dynamiques de la réponse à un échelon

Les définitions de l'erreur statique ϵ_s et du dépassement maximal D_{max} sont équivalentes aux définitions de la section 15.1.1.

- **Erreur de trainage ε_r**

L'erreur de trainage est l'écart la référence et la mesure de la variable pilotée lorsque ces deux dernières évoluent avec la même pente pendant la phase de rampe. Elle peut être exprimée dans l'unité de la variable pilotée ou en pourcentage de l'écart entre la valeur de la référence pendant la rampe et la valeur initiale de la référence.

- **Temps de retard à l'établissement t_{re}**

Le temps de retard à l'établissement est l'écart entre l'instant où la mesure de la variable pilotée, à laquelle on retranche sa valeur pré-rampe, reste dans une plage $\pm 1\%$ de sa référence à laquelle on retranche également sa valeur pré-rampe et l'instant de début de rampe.