

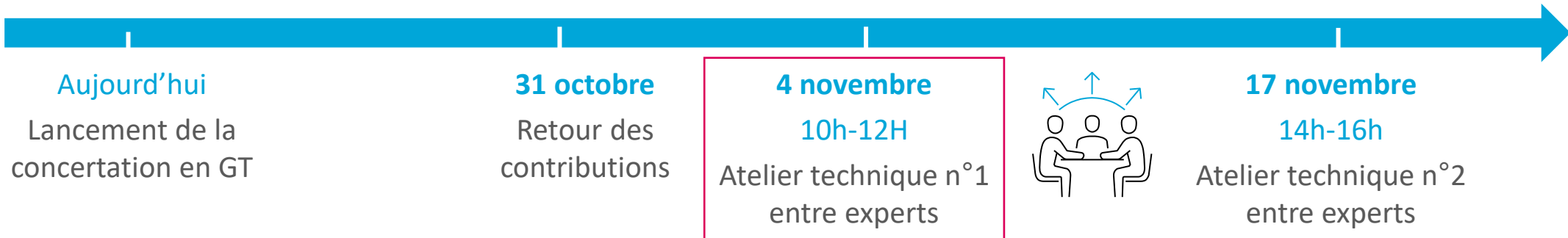


Le réseau  
de transport  
d'électricité

# Atelier technique n°1/2 Concertation Grid forming - Stockage non synchrone type C et D

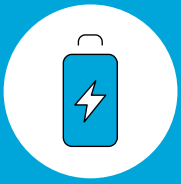
.....  
**04 novembre 2025**

**Public**



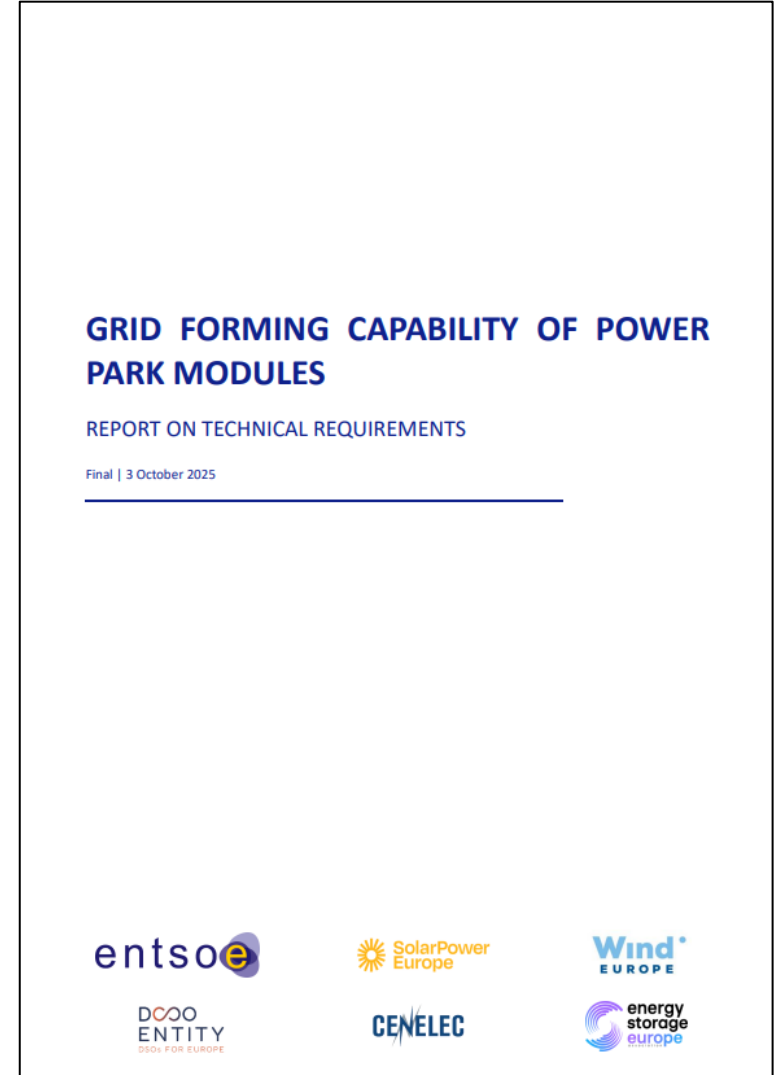
## Documents soumis à la concertation :

- Description de l'exigence Grid forming qui sera intégrée à la trame de cahier des charges capacités constructives. Version français et anglais.
  - Fiche de contrôle de conformité - Simulation (fiche I18)
  - Fichier excel pour les retours à la contribution
- 
- Les ateliers techniques du **04/11** (10h) et **17/11** (14h) permettront d'échanger sur la description technique de la proposition :  
→ **Merci de faire suivre l'invitation à toute personne en charge du contrôle de conformité et/ou des modèles de simulation à fournir lors de la mise en service de l'unité de stockage**



Le rapport ENTSOE sur les capacités grid forming dont les exigences ont été reprises est disponible ici : [lien](https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/Publications/SOC/20251104_GRID_FORMING_CAPABILITY_OF_POWER_PARK_MODULES.pdf)

[https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/Publications/SOC/20251104\\_GRID\\_FORMING\\_CAPABILITY\\_OF\\_POWER\\_PARK\\_MODULES.pdf](https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/Publications/SOC/20251104_GRID_FORMING_CAPABILITY_OF_POWER_PARK_MODULES.pdf)





**1. Présentation exigences techniques**

**2. Réponses aux contributions**

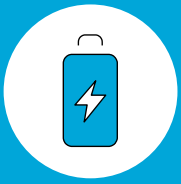
**3. Démonstration des calculs des enveloppes et du calcul de l'amortissement attendu**



## 1. Présentation exigences techniques

## 2. Réponses aux contributions

## 3. Démonstration des calculs des enveloppes et du calcul de l'amortissement attendu



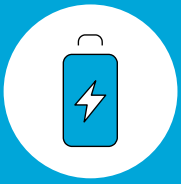
Grid Forming /  
stockeur

# Tirer le meilleur parti du matériel sans surdimensionnement

## Le grid forming: un comportement source de tension derrière une impédance

Ce comportement sera validé par une série d'exigence et de tests.

Une installation est grid forming, si et seulement si l'ensemble des onduleurs est grid forming.



## La caractérisation du comportement Grid forming, s'opposer aux variations du réseau

- L'injection instantanée de courant actif suite à un saut d'angle de tension du réseau.
- L'injection instantanée de courant réactif suite à une variation d'amplitude du réseau.
- La fourniture d'inertie lors de variation de fréquence du réseau.
- La fourniture de puissance active lors de variation d'impédance du réseau.
  
- Un contrôle de conformité à partir de gabarit à respecter pour différents tests et différents points de fonctionnement.
  
- Suppression de l'exigence d'injection de courant réactif sur défaut existante. (le GFM va réagir en fonction de l'impédance du défaut)

## Des informations supplémentaires nécessaires sur le comportement de l'installation

Lors des défauts, symétriques et asymétriques.

Une vision en impédance fréquentielle de l'installation.



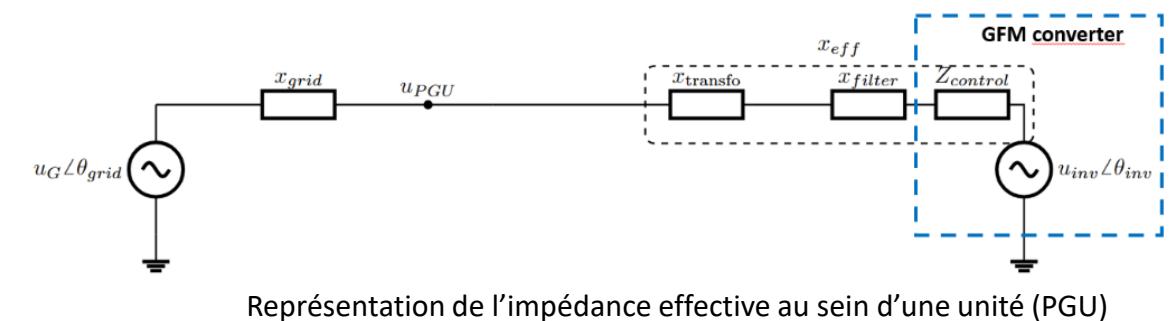
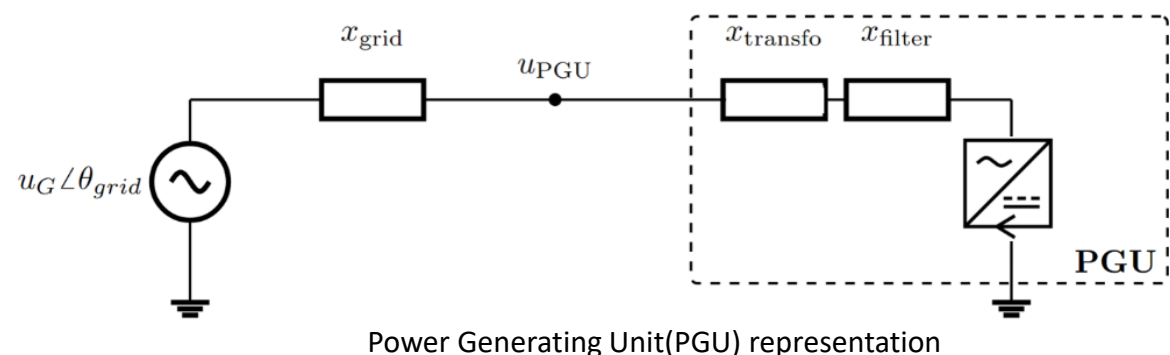
# Le grid forming pour le stockage est une solution pour améliorer la stabilité entre convertisseurs

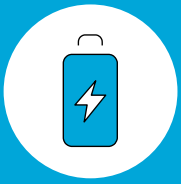
## Un comportement « idéal » modélisé ainsi

$$Z_{eff} = Z_{filter} + Z_{control} + Z_{transfo}$$

**Objectifs – intégrer le grid forming aux nouvelles installations de stockage pour limiter les phénomènes d’instabilité entre convertisseurs**

- Rte intégrerait l’exigence dans les limites de capacités en puissance (dimensionnement du convertisseur) et en énergie (dimensionnement de la batterie). C’est cette approche qui a aussi été utilisée dans la proposition de mise à jour du code de raccordement des producteurs/stockeurs RfG V2.
- **Cela évite tout surdimensionnement du système de stockage et les surcoûts.**





Tests réalisés avec les services systèmes désactivé (contrôle de tension et réglage de fréquence)

## Saut de phase :

**Objectifs : simuler un saut de phase qui amène à une variation de puissance active d'au moins 30%**

- Vérifier que 50% de la puissance active pic est fournie au bout de 10 ms.
- le courant actif doit se stabiliser autour de la valeur finale dans une bande de tolérance égale à la plus grande des deux valeurs suivantes :  $\pm 2\%$  du courant nominal et  $\pm 5\%$  of  $\Delta i_{P,PGU,peak}$ .
- Test effectué pour différentes conditions (point de fonctionnement, mais aussi impédance du réseau)
- Les courbes de puissance active devront être comprises dans les enveloppes.
- Les courbes **ne devront pas** présenter d'oscillation avec un amortissement inférieur à 50%

## Saut d'amplitude :

**Objectifs : simuler un saut de d'amplitude qui amène à une variation de puissance réactive d'au moins 15%**

- Vérifier que 90% du courant total est fournie au bout de 10 ms.
- le courant réactif doit se stabiliser autour de la valeur finale dans une bande de tolérance égale à la plus grande des deux valeurs suivantes :  $\pm 2\%$  du courant nominal et  $\pm 5\%$  of  $\Delta i_{Q,PGU}$ .
- Test effectué pour différentes conditions (point de fonctionnement, mais aussi impédance du réseau)
- Les courbes de puissance réactive devront être comprises dans les enveloppes.
- le courant réactif doit s'établir dans la bande de tolérance autour de sa valeur finale en 80 ms après l'évènement
- Les courbes **ne devront pas** présenter d'oscillation avec un amortissement inférieur à 50%



Tests réalisés avec les services systèmes désactivé (contrôle de tension et réglage de fréquence)

## Limitation des variations de fréquence

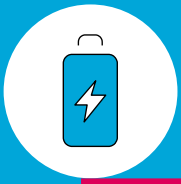
### Objectifs : simuler une variation de fréquence

- 500mHz/sec à la hausse et à la baisse pendant 3 secondes.
- 2Hz/sec à la hausse et à la baisse pendant 500 ms
- Test effectué pour différentes conditions (point de fonctionnement, mais aussi impédance du réseau)
- Les courbes de puissance active devront être comprises dans les enveloppes.
- Les courbes **ne devront pas** présenter d'oscillation avec un amortissement inférieur à 50%

## Variation d'impédance du réseau:

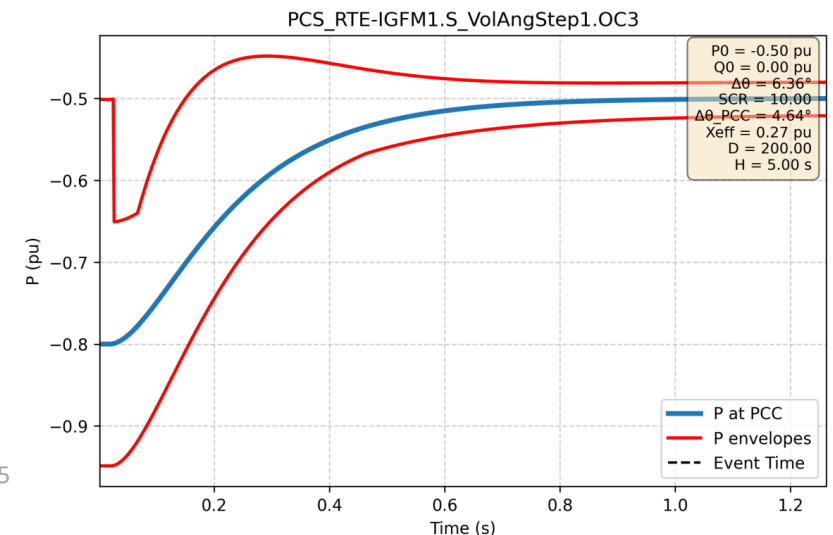
### Objectifs : simuler un changement de topologie et vérifier que la puissance est fournie rapidement

- Vérifier que 50% de la puissance active pic est fournie au bout de 10 ms.
- le courant actif doit se stabiliser autour de la valeur finale dans une bande de tolérance égale à la plus grande des deux valeurs suivantes :  $\pm 2\%$  du courant nominal et  $\pm 5\%$  of  $\Delta i_{P,PGU,peak}$ .
- Test effectué pour différentes conditions (point de fonctionnement, passage d'un SCR de 2 à 10 et inversement)
- Les courbes de puissance active devront être comprises dans les enveloppes.
- Les courbes **ne devront pas** présenter d'oscillation avec un amortissement inférieur à 50%



Réglage des paramètres pour créer les enveloppes

- $X_{eff}$ ,  $SCR_{min}$ ,  $SCR_{max}$  sont définis
- Plusieurs ensemble de valeurs sont fournis pour H et D afin de définir des comportements suramortis et sous-amortis.
  - $H \in [H_{base}, H_{base}(1 - \delta_H), H_{base}(1 + \delta_H)]$
  - $D \in [D_{base}, D_{base}(1 - \delta_H), D_{base}(1 + \delta_H)]$
  - La marge prise pour ces valeurs est de  $\delta_H=20\%$
- Marge aux enveloppes supérieure et inférieure ( $Margin_{up}$  &  $Margin_{down}$ ) de la réponse théorique. Leur valeur est égale à 30-50%
- Puissance active maximale et minimale pouvant être atteinte transitoirement par l'unité:  $P_{max}$ ,  $P_{min}$
- Bande de tolérance :  $\max(2\%I_n, 5\% \Delta P_{peak})$

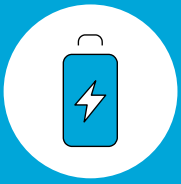




1. Présentation exigences techniques

**2. Réponses aux contributions**

3. Démonstration des calculs des enveloppes et du calcul de l'amortissement attendu



## Commentaire :

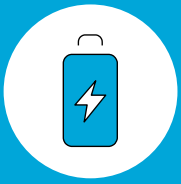
RTE indique s'appuyer sur les propositions de l'ACER et de l'ENTSOE pour RfG 2.0, sans en reprendre l'intégralité. RTE peut-il préciser pourquoi ce choix et comment RTE entend procéder pour la déclinaison des exigences prévues par RfG 2.0 et non embarquées dans cette concertation?

Dans le cas où des modifications du code RfG 2.0 par rapport à la proposition de l'ACER interviendraient lors de la phase de comitologie, comment RTE prévoit-il d'adapter les exigences proposées dans le cadre de cette concertation ?

## Réponse RTE :

Le document RTE se limite au stockage non synchrone, et ne reprend qu'une partie des exigences sur lesquelles la maîtrise par RTE et les acteurs est assurée. Certaines exigences comme la passivité de l'installation ou le comportement sur court-circuit n'ont pas encore de critère de conformité.

Les exigences seront en ligne avec le code RfG V2 sauf modification majeure, les déviations lorsqu'elles existent ne le sont que par rapport au document ENTSOE.



## Commentaire :

RTE peut-il préciser le lien entre les exigences proposées et le groupe de travail mené par EU DSO et Cenelec sur l'intégration d'actifs en grid forming dans le système électrique (dans le cadre de l'European Stakeholder Committee Grid Connection de ENTSO-E) ?

Réponse RTE :

Cette concertation ne concerne que les exigences pour les types C et D connectés au réseau de transport donc pas d'alignement a priori avec le document EU-DSO qui concerne les réseaux de distribution.

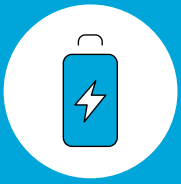
Pour ce qui est de CENELEC, le document ENTSOE a pris en compte les travaux en cours pour le chapitre 3 sur le contrôle de conformité.

## Commentaire :

Nous considérons que l'introduction d'exigences de capacités constructives de grid forming peut aider à couvrir les besoins en inertie à venir du système électrique tels qu'identifiés par ENTSO-E dans le cadre du Projet Inertie, et que cela laisse la porte ouverte à des mécanismes de valorisation de ce service auprès de l'ensemble des capacités le fournissant, qu'elles soient synchrones ou non-synchrones.

Réponse RTE :

Le comportement introduit dans cette concertation concerne surtout la force du réseau, c'est pourquoi un surdimensionnement en puissance ou en énergie n'est pas nécessaire. Un comportement inertiel est demandé que lorsqu'il peut être fourni sans interaction avec les autres services.



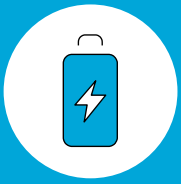
## Commentaire :

Nous considérons que les exigences de Grid-Forming en cours de consultation ne s'appliqueront pas aux projets de stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) équipées de groupes de pompage-turbinage à vitesse variable dans la mesure où celles-ci sont aujourd'hui rattachées aux unités de stockage synchrones suite à la déclinaison du code RfG V1.

Nous tenons néanmoins à alerter sur le cas particulier des STEP à vitesse variable de catégorie MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation) dans l'hypothèse où, à l'issue de l'entrée en vigueur du RfG 2.0, cette catégorie de machines MADA se verrait appliquer les mêmes exigences de Grid-Forming que les Power Park Modules ou le stockage non-synchrone. Ces machines, compte-tenu des interactions électromagnétiques dans le rotor, l'entrefer et le stator peuvent être structurellement limitées en termes de dynamique de réponse au Grid-forming. Etant donné le manque de retour d'expérience à date, il n'est pas possible de s'engager sur la réponse au Grid-Forming que ces machines seraient en mesure de fournir.

Réponse RTE :

L'exigence telle que formulée dans cette concertation n'est prévue que pour les stockages non synchrones (batteries).



## Commentaire :

Concernant le comportement inertiel en Grid-forming:

Une valeur du paramètre d'inertie  $T_{r,ppm}$  est introduite dans les documents soumis à concertation. S'agit-il d'une valeur fixe souhaitée par RTE ou seulement d'un paramètre de simulation ? Au titre des capacités constructives, il nous semblerait pertinent de définir une plage de valeurs (Min et Max) de  $T_{r,ppm}$  que les capacités peuvent paramétrer, plutôt qu'une valeur fixe.

Enfin, cette valeur de  $T_{r,ppm}$  donnée dans les documents est de 5s dans le document "Spécifications Grid Forming Conditions générales" (p.9) et de 10s dans la fiche simulation (p.4). Il nous semble que ces deux valeurs devraient être alignées. RTE peut-il clarifier la valeur de  $T_{r,ppm}$  ?

Réponse RTE :

Il y avait une erreur, c'est bien  $T = 10$  sec ( $H=5$ ) qui est demandé dans tout le document.

Cette valeur a été pensée fixe, quel avantage pour les stockeurs à avoir une valeur variable ?

## Commentaire :

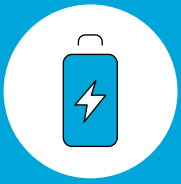
RTE indique que "la valeur de  $x_{eff}$  à utiliser est de 0.27 pu". RTE peut-il préciser comment cette valeur a été définie et s'il s'agit d'un paramètre physique ou d'un paramètre de simulation ?

Réponse RTE :

Cette valeur est issue du document ENTSOE, elle est recommandée comme la valeur maximum de ce paramètre.

C'est une valeur qui sert à déterminer un comportement de référence (elle est censée représenter physiquement l'impédance de filtre et du transformateur)

Cette valeur est une valeur par défaut, des valeurs plus élevées pourraient être spécifiées dans la convention d'exploitation.

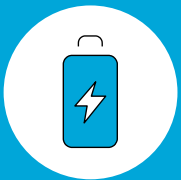


## Commentaire :

RTE peut-il préciser comment ont été déterminés les critères de fourniture du courant max de 10ms (paragraphe 2.1, 2.2 et 2.3) et de 100 ms (paragraphe 3) ? Ces temps de réponse dépendent en particulier de l'impédance Xgrid, dont la valeur n'est pas définie explicitement dans le document Spécifications Grid Forming Conditions générales.

Réponse RTE :

Les valeurs de 10 ms sont issues du document ENTSOE, la valeur de 100ms a été supprimée des exigences.  
La valeur de Xgrid est spécifiée indirectement car  $X_{grid} = 1/SCR$ .



## Commentaire :

- The expectations per RTE documents is for the grid forming plant to operate as a pure voltage source with a fixed voltage & phase angle as mentioned in section 2.1 & 2.2 of Grid forming specifications. A rigid voltage source cannot support system dynamics with other sources in the grid.
- A grid forming plant should operate as a controlled voltage source with dynamic voltage angle & magnitude adjustments governed either by droop or an inertia-based control. Thus, mimicking the physics of a synchronous machine rather than simple steady state behavior, this is the fundamental misunderstanding that we would like to address.

### 2.2 With regards to voltage source behavior in case of amplitude jumps

When an amplitude step occurs in the grid, the unit is expected to deliver reactive power to the grid as a consequence of its internal voltage amplitude being constant.

### 2.1 With regards to voltage source behavior in case of phase jumps

When a phase jump occurs in the grid, the unit is expected to deliver active power to the grid as a consequence of its internal phase angle being constant.

### 2.3 With regards to voltage source behavior in case of Short Circuit Ratio jumps

When topology changes on the grid and therefore a Short Circuit Ratio change occurs on the grid, the unit is expected to deliver active power to the grid as a consequence of its internal phase angle being constant.

Réponse RTE :

C'est une formulation reprise du projet de code RfG 2.0 et du document ENTSOE, l'installation doit se comporter **dans les premiers instants comme si la tension et l'angle interne du convertisseur étaient constants**. Le texte sera adapté pour mieux refléter cela.

Néanmoins, le comportement attendu est bien celui d'une source de tension pilotée par des équations en droop ou VSM pour l'angle, et un contrôle de tension.

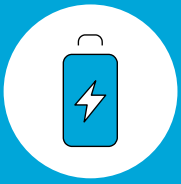
C'est d'ailleurs ce qu'on peut voir dans les gabarits de test qui sont utilisés par RTE. Sur le saut de phase, la puissance revient à sa puissance initiale, signe qu'une resynchronisation avec le réseau s'est opérée.



1. Présentation exigences techniques

2. Réponses aux contributions

**3. Démonstration des calculs des enveloppes et du calcul de l'amortissement attendu**

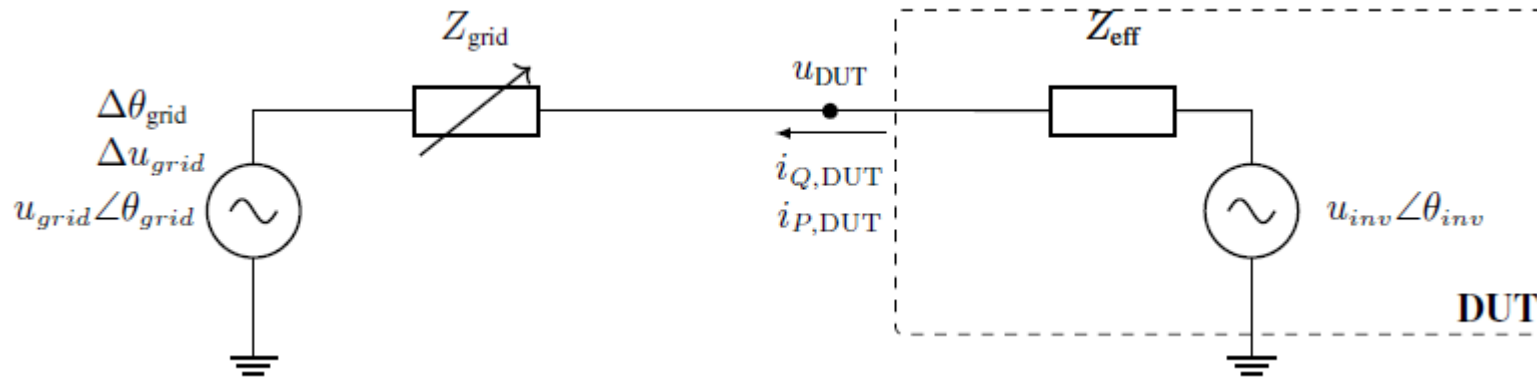


[Test damping python app RTE - Colab](#)

```
↳ Choisir des fichiers test_damping...er_meeting.csv  
test_damping_stakholder_meeting.csv(text/csv) - 27287 bytes, last modified: 10/03/2025 - 100% done  
Saving test_damping_stakholder_meeting.csv to test_damping_stakholder_meeting (1).csv  
Data Information:  
Number of rows: 1488  
Number of columns: 2  
Running Matrix Pencil Analysis...  
Matrix Pencil Analysis Results:  
Processing file: /tmp/tmp0lr_jicd.csv  
Parameters: Tstart=1.005, Tend=5.0, delta_t=0.005  
There were 1 mode(s) found in the range 0.1 to 10Hz  
Damped natural frequency of mode(s): [2.22680612]  
Natural frequency of mode(s): [2.2295917]  
Amplitudes of mode(s): [0.19979969]  
Damping ratio of mode(s): [0.0499717]
```



## Test benchmark for GFM capabilities compliance assessment:



$u_{grid}$ : tension du réseau équivalent

$u_{DUT}$ : tension du **PGU**

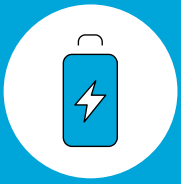
$u_{inv}$ : tension interne du **PGU**

$Z_{eff}$ : impédance effective du **PGU**

$Z_{grid}$ : impédance du réseau équivalent

$i_{P,DUT}$ : courant actif aux bornes du **PGU**

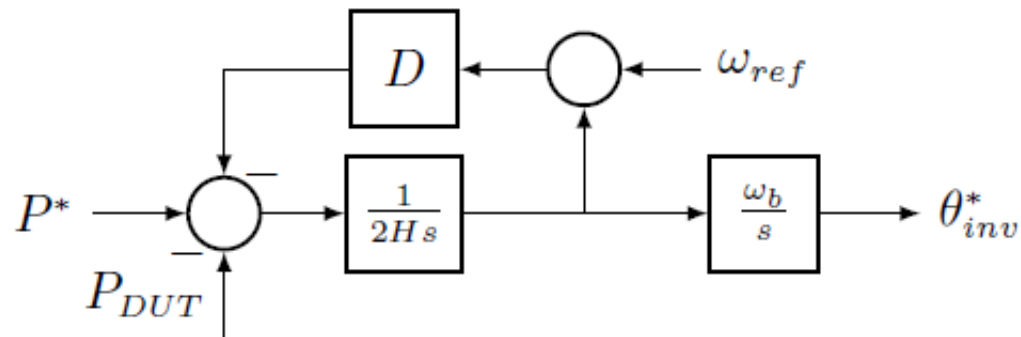
$i_{Q,DUT}$ : courant réactif aux bornes du **PGU**



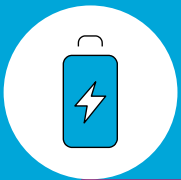
- **The powersynchronization loop**, définit la réponse de la puissance active et admet plusieurs implémentations. Dans cette étude, une structure classique de **VSM** est adoptée pour obtenir la dynamique de la puissance active. Cette considération conduit à :

$$P^*(s) - P(s) - D(\omega_{inv}^*(s) - \omega_{ref}(s)) = 2H s \omega_{inv}^*(s),$$

où **H** est l'inertie, **D** l'amortissement, et **s** l'opérateur de **Laplace**.



Powersynchronization loop (VSM scheme)



# Cas exemple pour calcul des enveloppes-Saut de phase

Réglage des paramètres pour créer les enveloppes

$$\Delta P_{peak} = \frac{u_{inv} u_{grid} \theta_{jump}}{x_{eff} + x_{grid}}$$

$r \ll x$

$\theta_{jump}$ : saut de phase côté réseau

- $X_{eff}, SCR_{min}, SCR_{max}$  sont définis
- Plusieurs ensemble des valeurs sont fournis pour H et D afin de définir des comportements suramortis et sous-amortis.
  - $H \in [H_{base}, H_{base}(1 - \delta_H), H_{base}(1 + \delta_H)]$
  - $D \in [D_{base}, D_{base}(1 - \delta_H), D_{base}(1 + \delta_H)]$
  - La marge prise pour ces valeurs est de  $\delta_H=20\%$

For  $\xi > 50\%$ ,

$\xi$  c'est le rapport d'amortissement

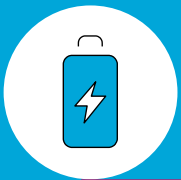
- Puissance active maximale et minimale pouvant être atteinte transitoirement par l'unité:  $P_{max}, P_{min}$
- Bande de tolérance :  $\max(2\%I_n, 5\% \Delta P_{peak})$
- Marge aux enveloppes supérieure et inférieure ( $Margin_{up}$  &  $Margin_{down}$ ) de la réponse théorique. Leur valeur est égale à 30-50%

$$P_{down} = P_0 - P_{peak}(1 - Margin_{down}) \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1 - \xi^2}} ;$$

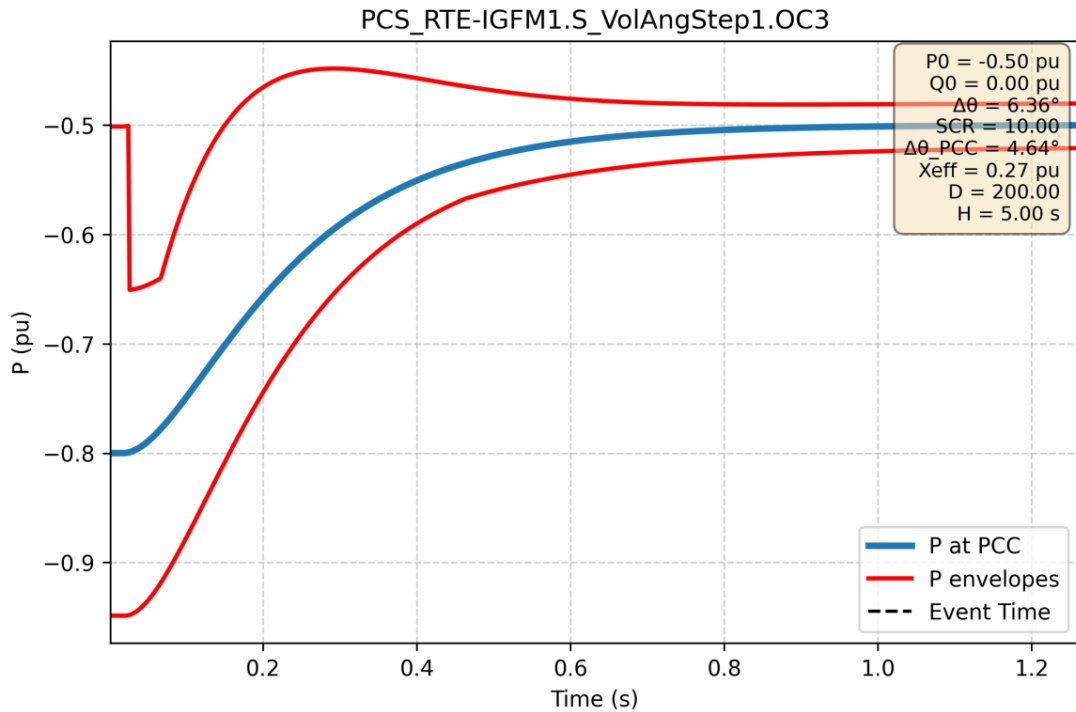
$$\Delta P = -\frac{P_{peak}}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_d t + \arctan(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi}))$$

$$P_{up} = P_0 + \Delta P(1 + Margin_{up}) \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1 - \xi^2}}$$

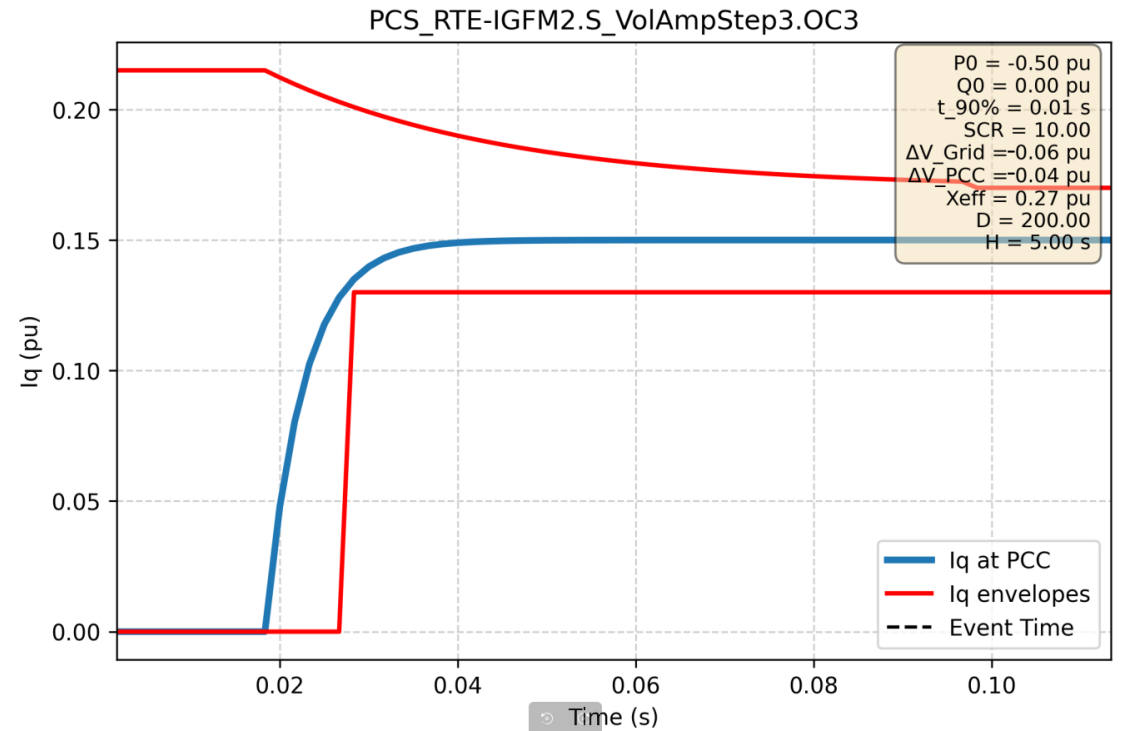
Pour être conforme aux exigences de l'ENTSO-E, la variable  $Margin_{down}$  doit être de 50 %.

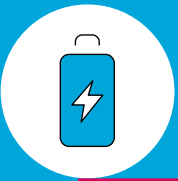


## Saut de phase :

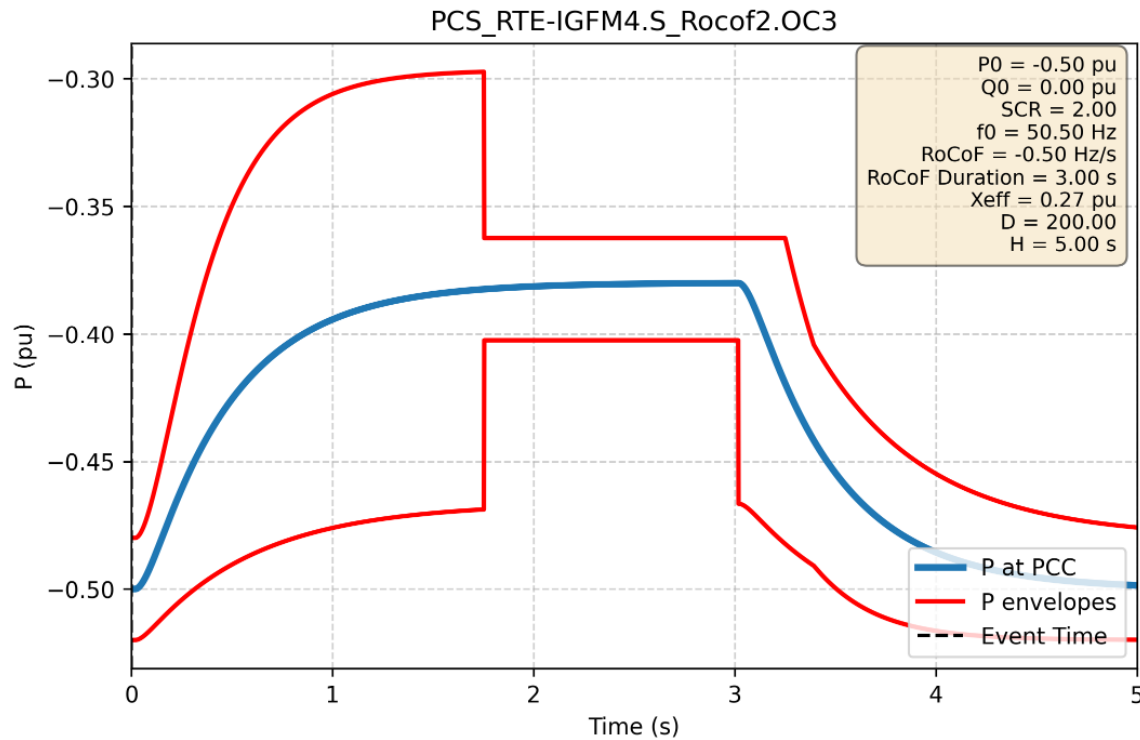


## Saut d'amplitude :

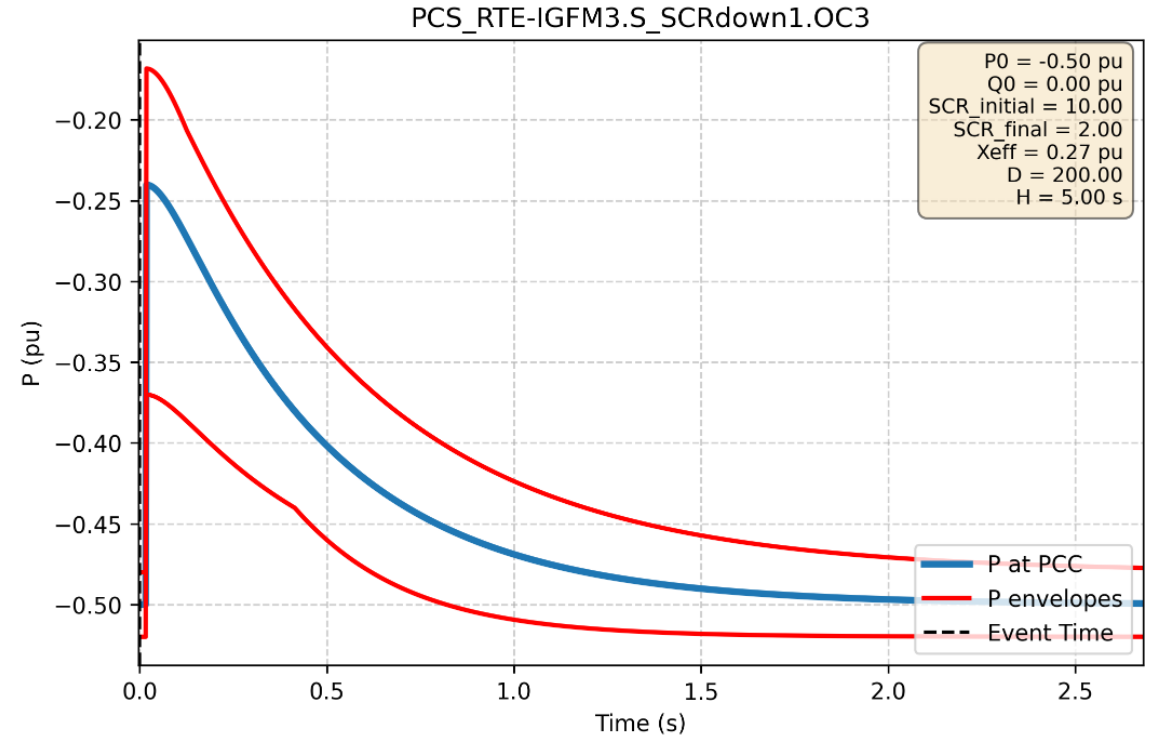


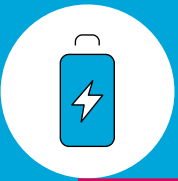


## Limitation des variations de fréquence



## Variation d'impédance du réseau:

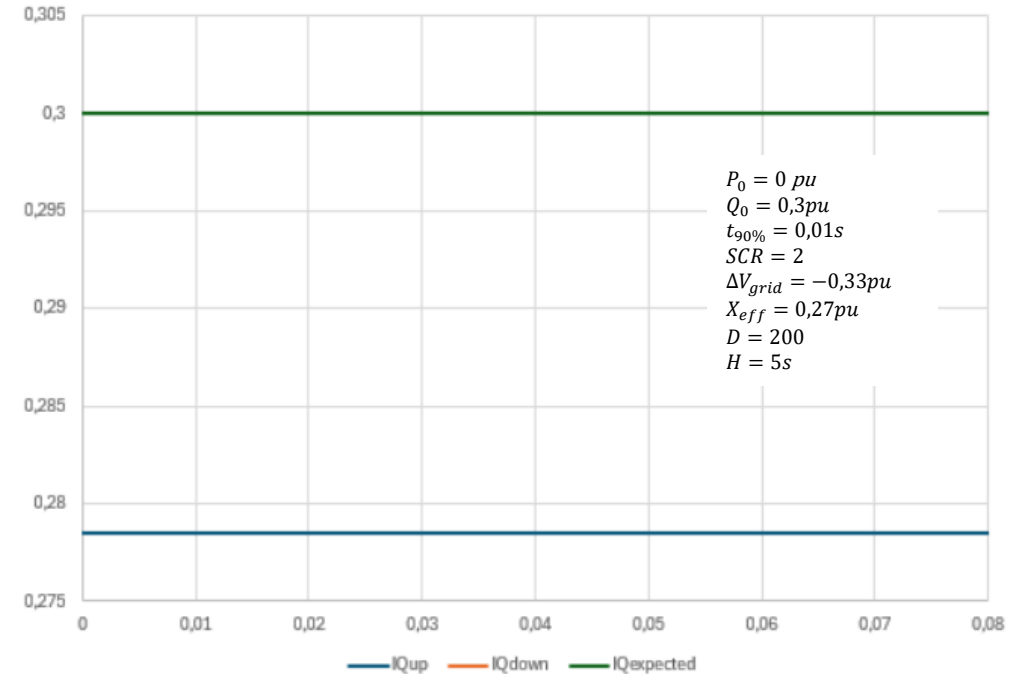
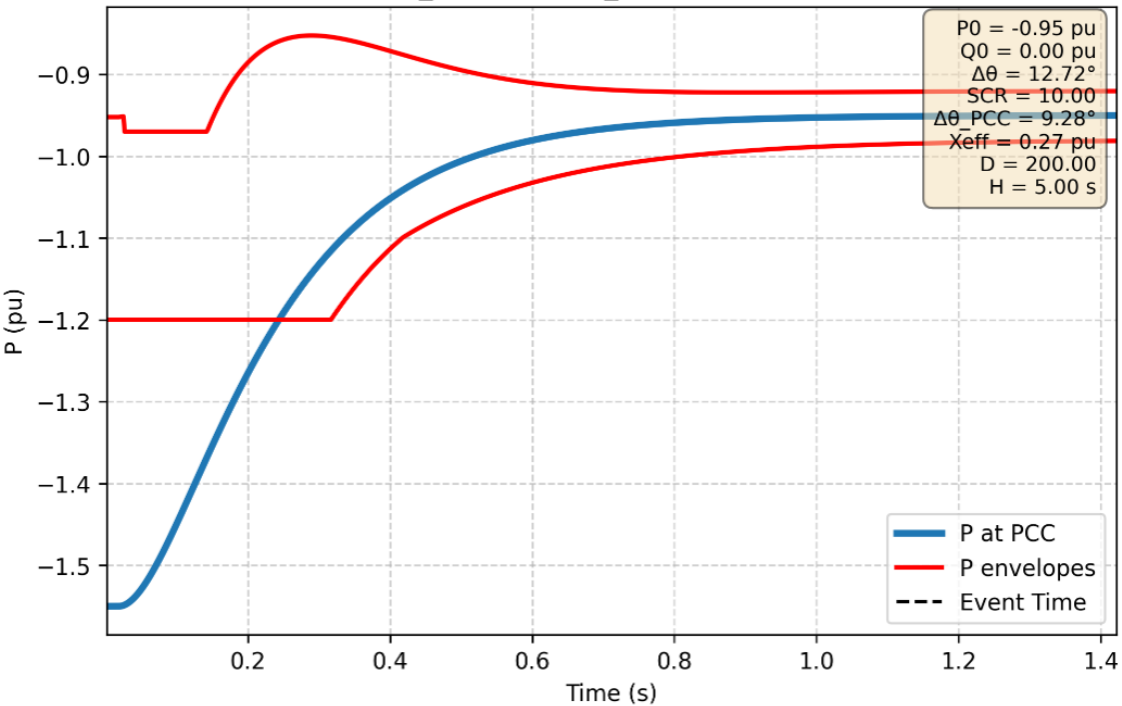


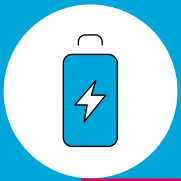


## Saut de phase :

## Saut d'amplitude :

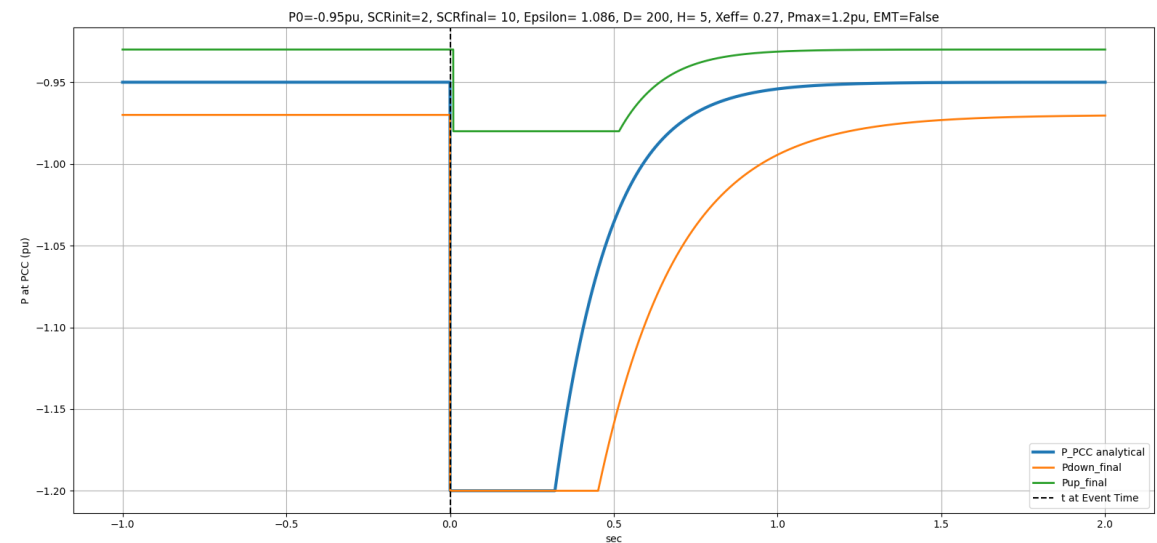
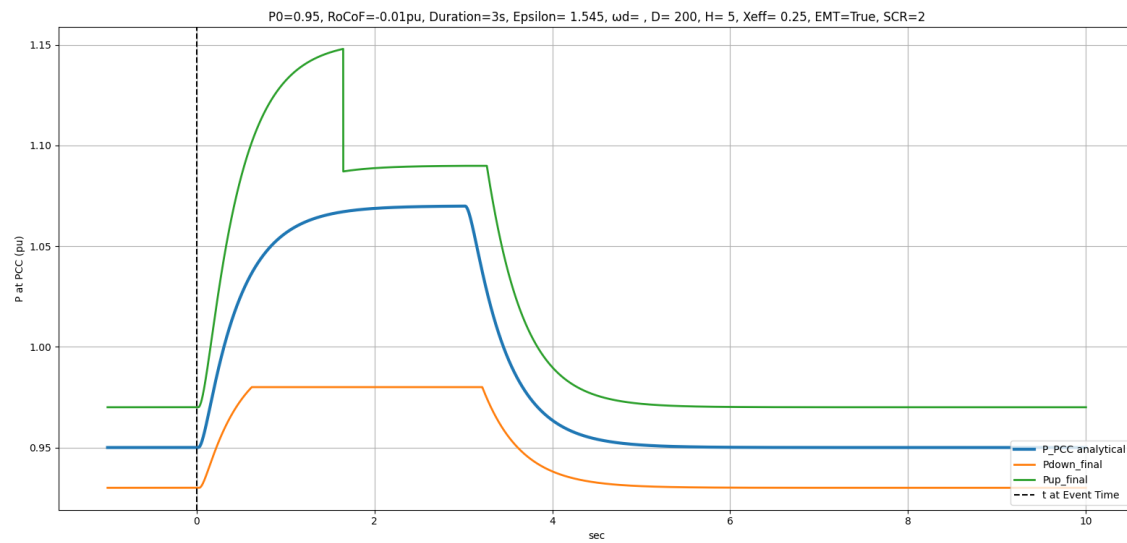
PCS\_RTE-IGFM1.S\_VolAngStep5.OC5

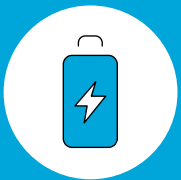




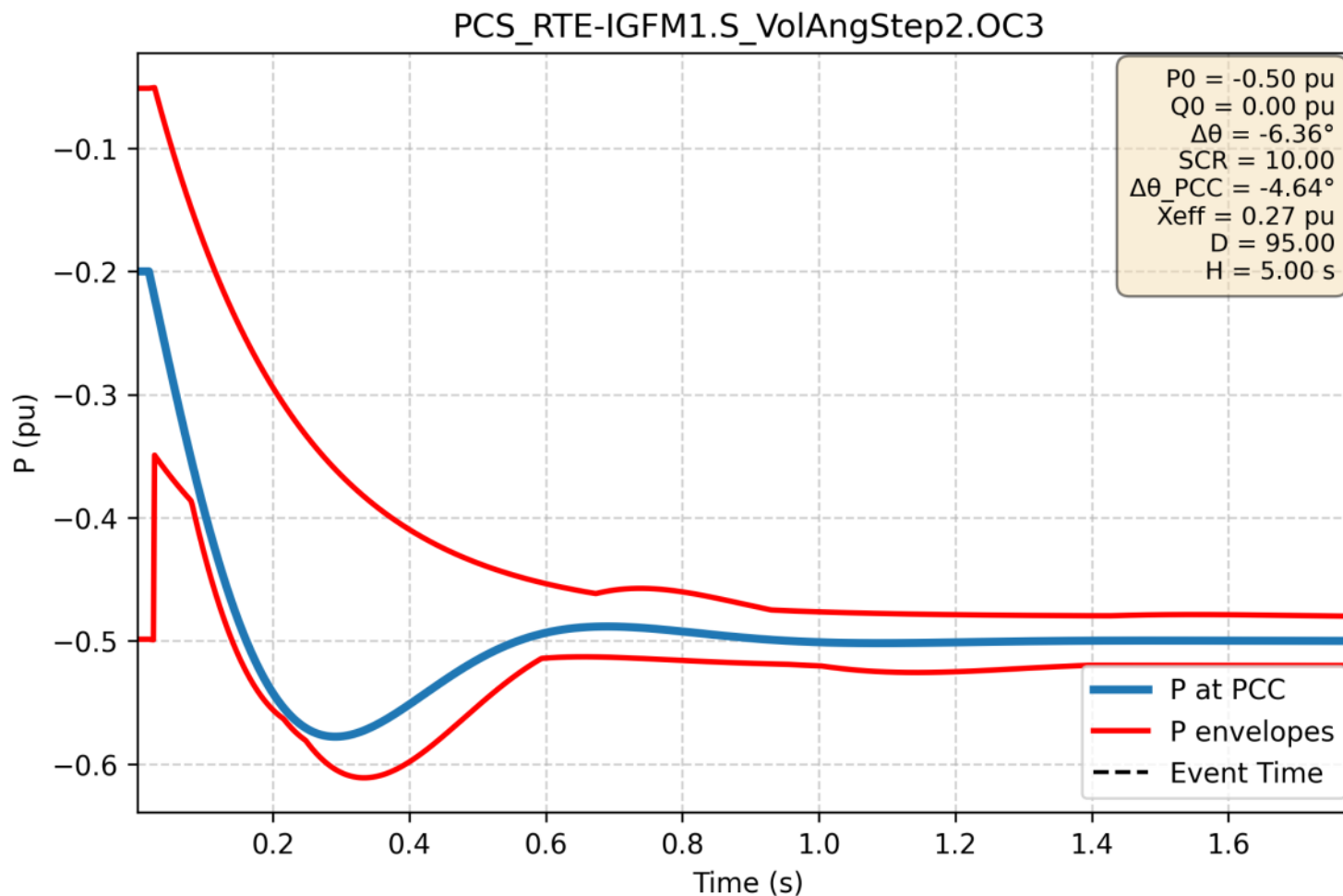
## Limitation des variations de fréquence:

## Variation d'impédance du réseau:



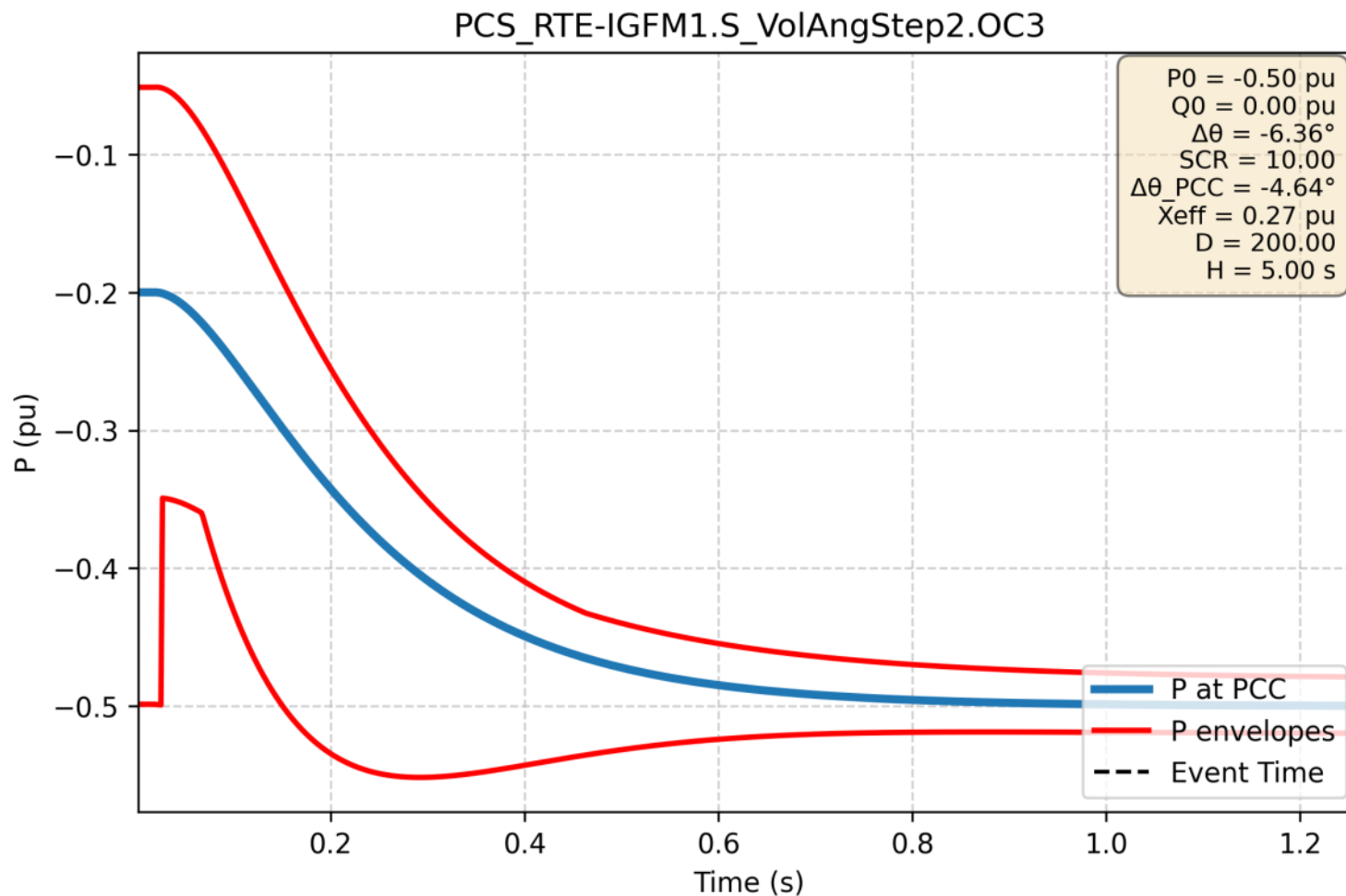


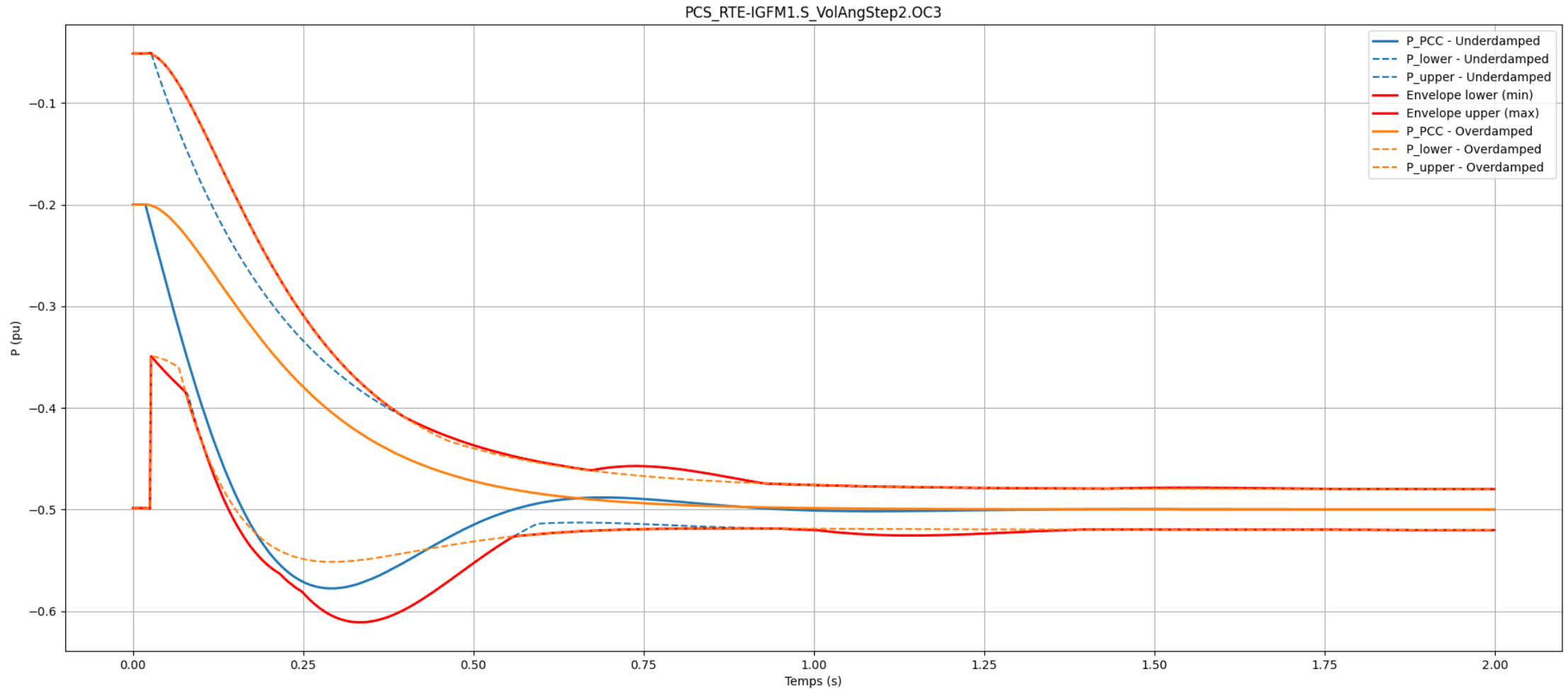
# Gabarit pour le test saut de phase – sous-amortie





# Gabarit pour le test saut de phase – sur-amortie





# Merci

