Power Quality

*Figure 1: Photo du superordinateur JUPITER (centre de calcul) © Forschungszentrum Jülich / Sascha Kreklau*

# Surveillance continue du réseau électrique dans le centre de données du Forschungszentrum Jülich avec JUPITER - le superordinateur le plus rapide d'Europe

Le Forschungszentrum Jülich exploite l'une des plus grandes infrastructures de recherche d'Europe. Avec JUWELS* et JUPITER, le premier superordinateur exascale d'Europe et actuellement l'ordinateur le plus rapide du continent**, les exigences en matière de stabilité du réseau, de disponibilité et de qualité de tension conforme aux normes augmentent considérablement. Le module JUPITER-Booster atteint 793,40 PFLOPS et fonctionne à l'électricité renouvelable. Cette densité de puissance engendre des variations de charge très dynamiques pouvant avoir un impact direct sur la qualité de la tension. Le réseau du campus, en moyenne et basse tension, intègre parallèlement des installations de recherche, des laboratoires, des centrales de cogénération, des systèmes photovoltaïques, des batteries de stockage, des bornes de recharge V2G et des centres de données.

* (7e place du TOP500, 2020)
** (Europe : 1re place du TOP500, Monde : 4e rang, 2025)

RAPPORT D'APPLICATION

## 1. Situation initiale

Avant JUPITER, plus de 120 appareils de mesure étaient déjà installés sur l'ensemble du campus, y compris dans JUWELS. Parmi eux figuraient les **PQI-DA smart** et **PQI-DE**, avec une évaluation centralisée et un accès aux données à faible latence pour les serveurs de simulation, permettant de créer un jumeau numérique du réseau moyenne tension du campus.

**Situation initiale – Aperçu**

- Exploitation exascale avec des exigences très élevées en matière de qualité de tension et de disponibilité
- Réseau du campus avec des profils mixtes de charge et d'injection
- Plus de 120 points de mesure comme base, extensible pour JUPITER (17 points supplémentaires)
- Accès aux données à faible latence pour la recherche et la validation de modèles

## 2. Défis typiques pour les centres de données

Les centres de données sont sensibles aux creux de tension, au papillotement, aux événements transitoires, aux harmoniques et aux supraharmoniques. Les charges intensives en GPU et les systèmes de refroidissement provoquent des variations de charge rapides. L'intégration de centrales de cogénération, d'installations photovoltaïques, de systèmes de stockage et d'infrastructures V2G modifie les flux de charge et les spectres de fréquence jusqu'à 20 kHz. Outre la maîtrise technique, il est nécessaire d'assurer un enregistrement et une documentation conformes aux normes IEC 61000-4-30 Classe A et EN 50160. En parallèle, la surveillance doit être économiquement évolutive.

En particulier dans les infrastructures HPC comme JUPITER, des variations de courant à haute fréquence se produisent en raison des transitions de fréquence et de charge des grappes de GPU. Celles-ci entraînent des surélévations harmoniques de courte durée et des effets de couplage sélectifs en fréquence entre les niveaux moyenne et basse tension. Une surveillance continue et à haute résolution de la qualité de l'énergie permet d'identifier ces phénomènes transitoires avant qu'ils n'affectent les alimentations électriques sensibles ou les systèmes d'onduleurs (UPS).

**Défis – Aperçu**

- Forte dynamique de charge due aux tâches HPC et au refroidissement
- Phénomènes PQ jusqu'à 20 kHz causés par l'électronique de puissance
- Obligation d'enregistrement et de documentation conformes aux normes
- Surveillance évolutive avec des coûts d'exploitation maîtrisés

## 3. Objectif du projet

Les objectifs principaux incluent la transparence complète des flux de charge, la validation des modèles de simulation et de réseau, un système d'alerte précoce efficace pour les événements critiques et une flexibilité pour les extensions futures.

**Objectifs du projet – Aperçu**

- Transparence, validation, alerte précoce, flexibilité, conformité
- Valeurs moyennes sur 10 minutes plus enregistrements d'événements
- Base de temps précise et évaluation centralisée basée sur les rôles

Les données de mesure collectées ne servent pas uniquement à la surveillance de l'exploitation, mais sont également utilisées directement pour la validation des jumeaux numériques du réseau du campus. Ainsi, le centre de recherche peut simuler de manière réaliste les temps de réaction, la stabilité de la tension et les interactions réseau, puis comparer les résultats avec les données en direct provenant des systèmes PQI.

## 4. Solution technique d'A. Eberle

Le FZJ applique une architecture en plusieurs niveaux composée de **PQI-DE**, **PQI-DA smart** et **WebPQ®**. Des **PQI-DE** sont installés aux points critiques, leur grand écran permettant un accès direct en temps réel aux données de mesure. Dans les niveaux inférieurs du réseau, des **PQI-DA smart** sont montés sur rail DIN - compacts, économiques et optimisés pour une surveillance à grande échelle. **WebPQ®** regroupe tous les points de mesure, rapports et alarmes dans une interface centrale via navigateur.

Le système de mesure mis en œuvre est synchronisé temporellement via des serveurs horaires basés sur GPS ou NTP, permettant de corréler précisément les événements sur plusieurs niveaux de tension. Cette synchronisation est essentielle pour identifier clairement les relations de cause à effet, par exemple entre les réseaux moyenne et basse tension.

### 4.1 PQI-DE aux nœuds critiques

*Figure 2: **PQI-DE** – Surveillance aux nœuds critiques du centre de données*

**PQI-DE – Aperçu**

- Mesure de classe A pour les nœuds critiques du réseau
- Grand écran pour accès direct aux données de mesure
- Enregistrements d'événements déclenchés et taux d'échantillonnage élevés
- Synchronisation et grande mémoire locale

## 4.2 PQI-DA smart sur le terrain

*Figure 3:* **PQI-DA smart** *– pour l'extension des points de mesure dans les niveaux inférieurs du réseau*

**PQI-DA smart – Aperçu**

- Conception compacte pour montage sur rail DIN
- Conçu pour des sous-mesures évolutives
- Mesure de classe A pour tension, courant, harmoniques
- Déploiement économique à l'échelle du réseau

## 4.3 Concept de mesure et chemin de données

Sur l'ensemble du campus, plus de 140 points de mesure sont actifs, dont environ 15 **PQI-DE** dans l'environnement JUPITER, complétés par de nombreux **PQI-DA smart** sur les nœuds secondaires.

## 4.4 Plateforme logicielle WebPQ®

**WebPQ® – Aperçu**

- Analyse centralisée via navigateur avec rôles et autorisations
- Données en direct, alarmes, rapports normatifs, exportations
- Modbus TCP/IP et OPC UA pour l'intégration système

*Figure 4:* ***WebPQ®*** *– Analyse centrale PQ pour tous les points de mesure du réseau JUPITER*

## 4.5 Sécurité informatique dans WebPQ®

Dans le contexte des centres de calcul haute performance, la sécurité informatique de la plateforme de surveillance est cruciale. **WebPQ®** répond aux exigences actuelles en matière de sécurité des données et de cyberrésilience :

- Communication chiffrée via HTTPS et TLS
- Gestion des utilisateurs et des droits basée sur les rôles
- Mécanismes d'authentification sécurisés (y compris options 2FA)
- Traçabilité et journalisation infalsifiable
- Segmentation optionnelle dans des réseaux protégés

Cela garantit que les données PQ critiques sont enregistrées et traitées de manière sécurisée - une exigence essentielle pour les exploitants de centres de données et d'infrastructures de recherche. De plus, **WebPQ®** prend en charge, en option, l'intégration dans des systèmes de gestion des informations et des événements de sécurité (SIEM), permettant d'intégrer les événements et alertes liés à la sécurité dans le concept global de sécurité du centre de recherche - un élément clé pour la protection des infrastructures critiques de recherche et d'énergie.

# 5. Résultats de mesure et conclusions

## 5.1 Flux de charge et analyses de tendance

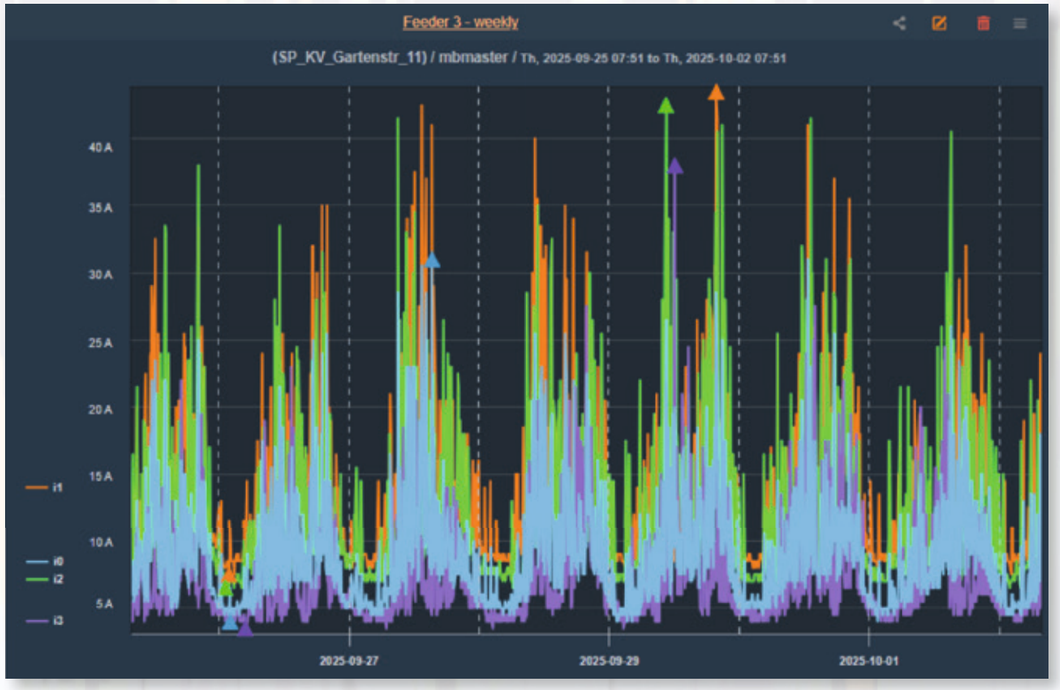


*Figure 5a: Courbes de courant (I1, I2, I3) à résolution hebdomadaire pour un départ sélectionné. L'illustration montre des profils de charge journaliers typiques et des pics de charge caractéristiques, tels qu'observés dans l'exploitation HPC du Forschungszentrum Jülich.*

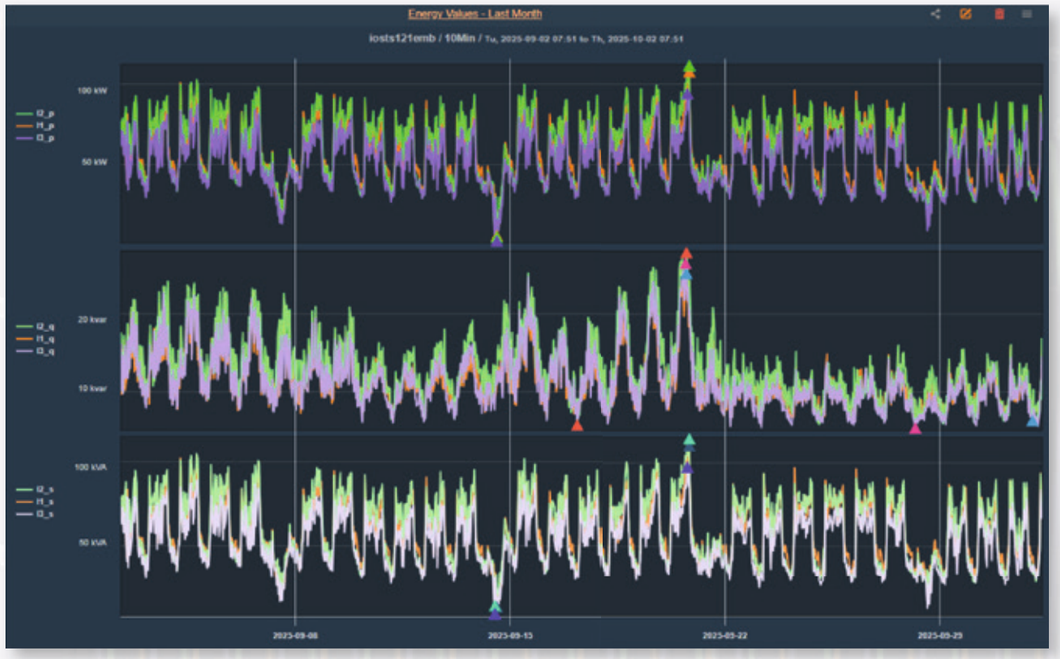


*Figure 5b: Courbes de puissance (P, Q, S) à résolution mensuelle. Des schémas récurrents de charge de base et de pointe ainsi que des différences de comportement de la puissance réactive sont visibles - comparables aux profils dynamiques du centre de calcul JUPITER.*

*Figure 5c: Courbes de tension (U1, U2, U3) à résolution mensuelle. L'illustration montre des fluctuations et des creux de tension typiques dans des environnements HPC à forte dynamique de charge.*

L'évaluation des courbes de courant et de tension permet une analyse précise de la symétrie du réseau et de la répartition des charges de phase. L'analyse des tendances à long terme permet de détecter précocement les changements progressifs du comportement de charge, causés par exemple par des mises à jour logicielles, des extensions de serveurs ou des stratégies de refroidissement modifiées.

## 5.2 Transitoires et temps de réaction

*Figure 6a: Enregistrement transitoire lors du démarrage parallèle de plusieurs tâches HPC. On distingue un creux de tension de courte durée et une déviation de fréquence causés par la forte puissance d'appel.*

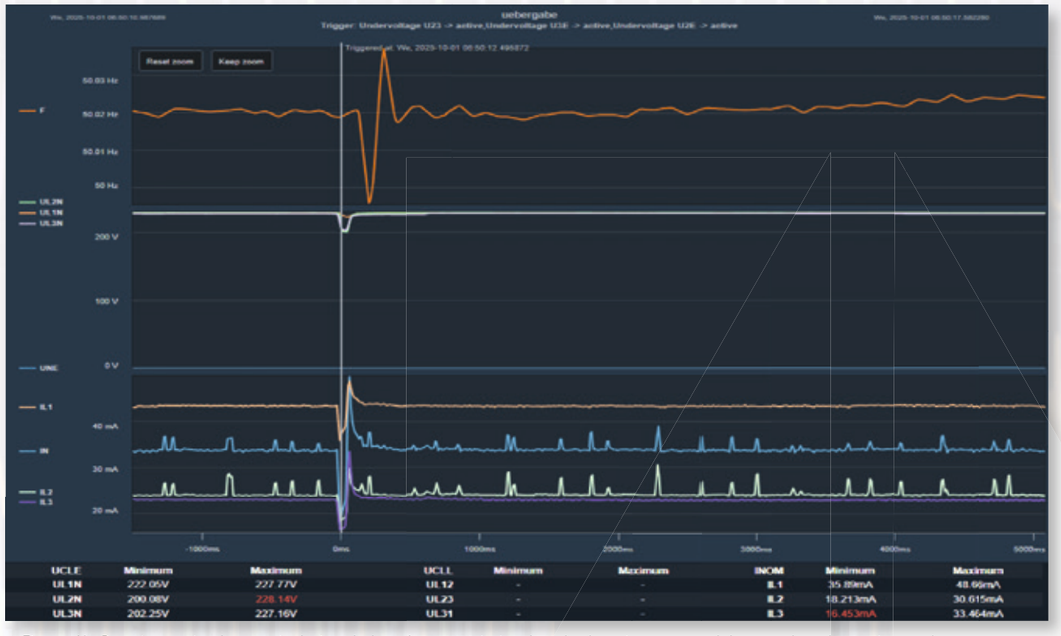


*Figure 6b: Représentation haute résolution de la même transitoire dans le domaine temporel. Les courbes de tension et de courant montrent les courants d'appel dynamiques des alimentations des serveurs et la charge du réseau pendant la phase de démarrage.*

La combinaison d'un enregistrement déclenché par événement et d'un taux d'échantillonnage élevé (jusqu'à 200 kHz par canal) permet de capturer avec précision les creux de tension dans la gamme des millisecondes et d'en quantifier l'impact sur les systèmes UPS ou les charges sensibles en aval.

## 5.3 Harmoniques et supraharmoniques

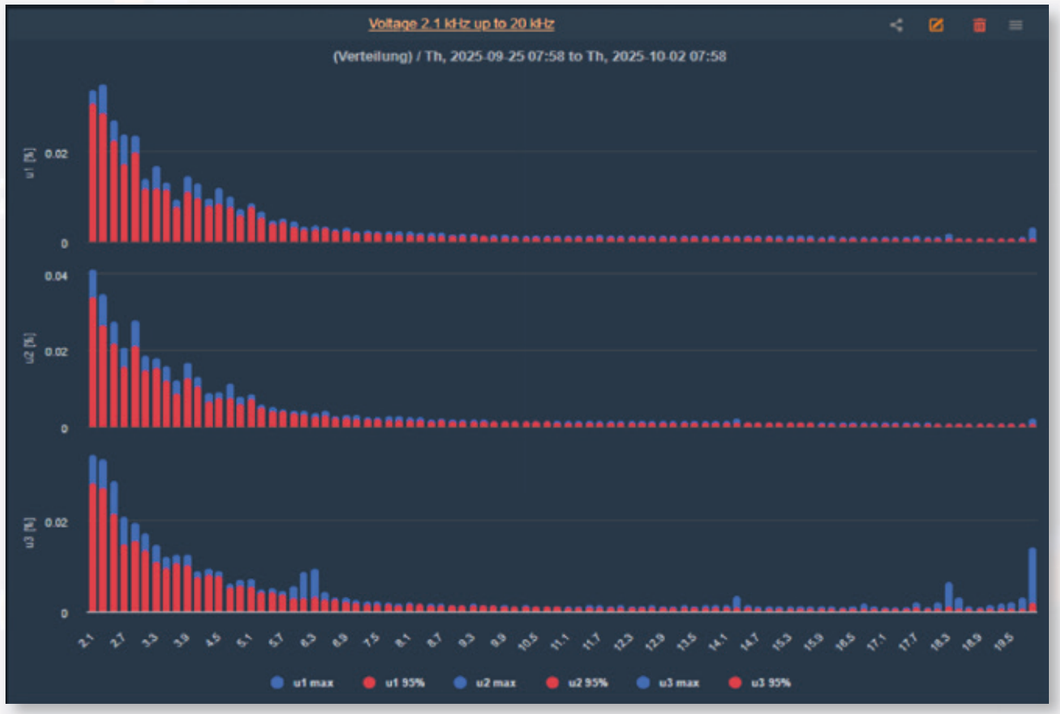


*Figure 7: Analyse des harmoniques et supraharmoniques jusqu'à 20 kHz. Les distributions montrent des pics spectraux typiques générés par les alimentations à découpage des serveurs. Des effets sélectifs en fréquence et des zones de résonance potentielles ont été identifiés et intégrés à la planification des filtres et selfs.*

L'analyse des supraharmoniques jusqu'à 20 kHz a permis d'identifier des clusters spectraux correspondant aux fréquences de commutation de certaines alimentations. Ces résultats constituent la base pour le dimensionnement ciblé des filtres et l'optimisation CEM de l'alimentation électrique.

## 6. Utilité pour l'exploitant

Le concept combiné **PQI-DE**, **PQI-DA smart** et **WebPQ®** offre une transparence complète, depuis l'alimentation principale jusqu'à la distribution secondaire, prouve la conformité aux normes et fournit une base solide pour la prise de décision.

Le système fournit également des indicateurs clés précieux pour la gestion énergétique et la planification des capacités. L'analyse continue de la puissance réactive et des asymétries de tension permet de réduire les coûts d'exploitation et d'optimiser le fonctionnement des composants du réseau en fonction de la charge.

## 7. Conclusion et perspectives

Le projet démontre comment concilier les exigences de l'exascale et la transition énergétique: grâce à la mesure de classe A, à une architecture hiérarchisée et à une évaluation centralisée. Cette approche est transférable à d'autres centres de données et réseaux de campus. Les prochaines étapes incluent une automatisation accrue, l'analyse prédictive et un couplage plus étroit entre la surveillance, la simulation et la régulation.

À long terme, des modèles d'apprentissage automatique intégrés à **WebPQ®** pourront reconnaître automatiquement des schémas récurrents et générer des alertes précoces – une avancée vers une surveillance énergétique autonome dans les centres de calcul haute performance.

## 8. Normes, méthodes de mesure et intégration dans les environnements de simulation

Les mesures ont été effectuées conformément à la norme IEC 61000-4-30 Éd. 4 Classe A. Les harmoniques ont été mesurées selon IEC 61000-4-7, le papillotement selon IEC 61000-4-15, et les supraharmoniques dans la plage de 2 à 20 kHz. La documentation suit la norme EN 50160. Des moyennes sur 10 minutes sont utilisées pour les rapports de tendance, tandis que les enregistrements déclenchés par événement capturent les phénomènes transitoires. Une base de temps précise et une synchronisation assurent la cohérence entre les points de mesure distribués. **WebPQ®** sert de source de données centrale pour la salle de contrôle et la recherche, avec intégration via Modbus TCP/IP.

Grâce à des interfaces normalisées (CSV, OPC UA, REST API), les données de mesure sont directement importées dans des environnements de simulation et de recherche tels que MATLAB®/Simulink® ou DIgSILENT PowerFactory®. Cela permet la corrélation entre le comportement réel et simulé du réseau, ainsi que l'étalonnage des modèles de flux de charge et de stabilité.

## 9. Nouveauté produit: PQI-LV

**Le PQI-LV vient d'être lancé.**

Cet appareil de mesure est conçu pour être particulièrement économique dans les applications basse tension nécessitant un grand nombre de points de mesure avec une haute précision et à un prix attractif. Il complète parfaitement la gamme existante et ouvre de nouvelles possibilités aux exploitants souhaitant surveiller la qualité de l'énergie de manière étendue et rentable.

Dans des applications similaires, comme celles des centres de données du FZ Jülich, le **PQI-LV** se prête particulièrement bien à la surveillance continue du niveau basse tension dans les salles serveurs et les laboratoires, où l'espace et le budget sont limités, mais où une surveillance précise de la tension reste essentielle.

*Figure 8: **PQI-LV** – nouvelle solution économique pour les réseaux basse tension*

## Auteurs

**Fabian Leppich**

Chef de produit »PQSys«
A. Eberle GmbH & Co. KG

**Maximilian Sefz**

Directeur marketing
A. Eberle GmbH & Co. KG

**Wolfgang Reitmeier**

Ventes
A. Eberle GmbH & Co. KG

*Figure 9: Photo du superordinateur JUPITER (centre de calcul) © Forschungszentrum Jülich / Sascha Kreklau*

JÜLICH
Forschungszentrum

**Avez-vous des questions ou souhaitez-vous recevoir des conseils sur nos solutions de surveillance continue du réseau pour les centres de données, les fournisseurs d'énergie ou les réseaux industriels de campus?**

**Scannez simplement le code QR ou écrivez-nous à sales@a-eberle.de**

**Nous attendons votre message avec impatience!**

A. Eberle GmbH & Co. KG
Frankenstraße 160
D-90461 Nürnberg
Tel +49(0)911 628108-0
Fax +49(0)911 628108-99
sales@a-eberle.de
www.a-eberle.com

11/25