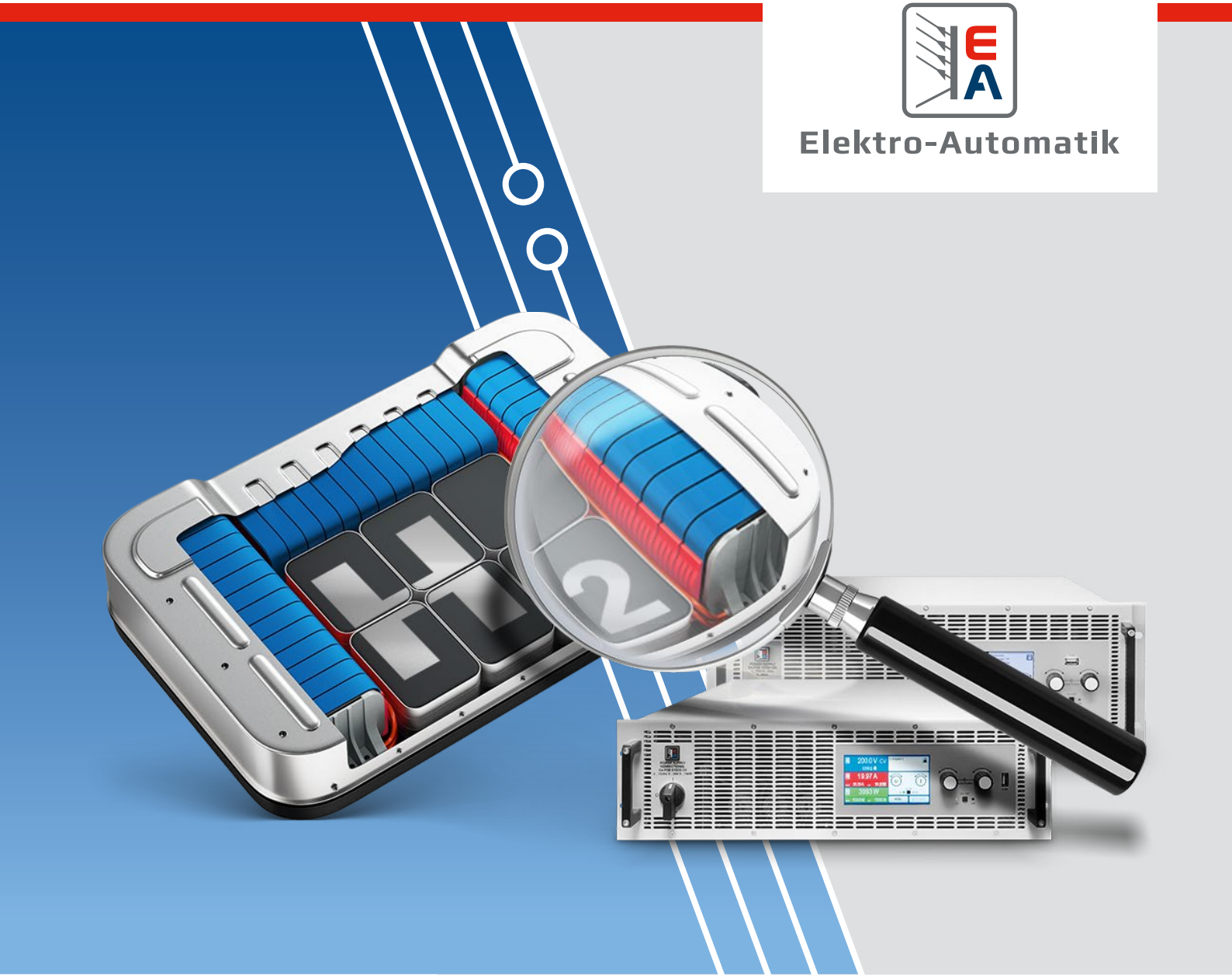
Elektro-Automatik



TEST SIMPLE ET EFFICACE DES PILES À COMBUSTIBLE

Outenir le progrès en termes d'énergie neutre sur le plan climatique

simplifié

économique

durable

Test de systèmes de piles à combustible

Les piles à combustible utilisent l'hydrogène comme carburant, qui combiné à l'oxygène, produit de l'électricité. Les deux produits du processus électrique sont la chaleur et l'eau. Avec des émissions de gaz à effet de serre et de dioxyde de carbone nulles, l'utilisation des piles à combustible comme sources d'énergie contribue à la réduction nécessaire du dioxyde de carbone dans l'environnement. La Figure 1 montre comment fonctionne une pile à combustible. L'hydrogène et l'oxygène forment des ions via l'oxydation sur une anode et une réduction sur une cathode.

L'énergie chimique des réactions est convertie en énergie électrique en tant qu'électrons qui peuvent circuler de l'anode vers la cathode, à l'aide d'une charge externe et de protons circulant de l'anode vers la cathode à l'aide de l'électrolyte. Les produits finaux sont l'eau et la chaleur, sans aucun dioxyde de carbone. La pile à combustible illustrée est une pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEM).

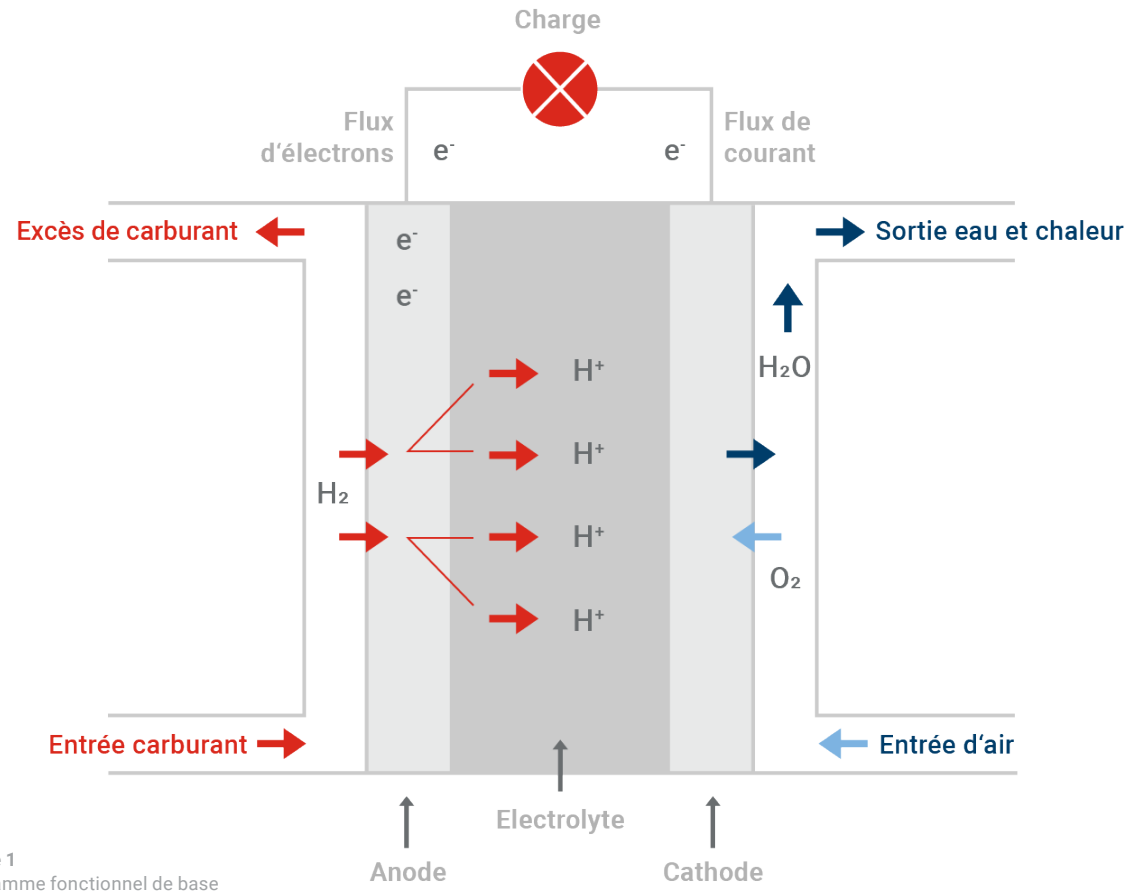


Figure 1
Diagramme fonctionnel de base d'une pile à combustible à membrane d'échange de protons

Les piles à combustible* trouvent leurs applications dans les véhicules de manutention, les véhicules de transport, les camions long-courriers, et utilisées comme systèmes d'alimentation de secours. Les initiatives du gouvernement, les incitations économiques et les nouvelles applications se traduisent par une croissance du marché de plus de 30%.

Une pile à combustible individuelle génère moins de 2 V en sortie, donc les piles à combustibles sont empilées ou regroupées en systèmes. Les piles à combustible peuvent délivrer en sortie jusqu'à 125 kW pour des véhicules; et, plus elles sont grandes, être utilisées comme alimentation de secours, pouvant proposer une capacité de 1,5 MW et fonctionner à 900 V. Comme la technologie de la pile à combustible est améliorée, les fabricants devront concevoir des systèmes de piles à combustible plus puissants et avec des tensions supérieures.

Avec de telles capacités de puissances élevées, le test des systèmes de piles à combustible est essentiel afin de s'assurer qu'elles disposent d'une efficacité minimale spécifiée, qu'elles soient sûres, et qu'elles aient la durée de vie requise. Les charges électroniques et les alimentations bidirectionnelles de EA Elektro-Automatik possèdent des capacités d'entrée et de sortie élevées, afin de tester les systèmes de piles à combustible. Les charges électroniques sont disponibles avec des modèles atteignant 30 kW et des tensions de sortie de 2000 V. La capacité en courant peut atteindre 1000A. Jusqu'à 64 charges peuvent être mises en parallèle pour permettre le test des piles à combustible avec des niveaux de puissance jusqu'à 1,92 MW. La même puissance et la même capacité de mise en parallèle d'instruments existe avec les alimentations bidirectionnelles soit pour délivrer, soit pour récupérer l'énergie.

Mesure de la résistance de la pile à combustion en utilisant une technique de perturbation AC

La Figure 2 montre un modèle de circuit simplifié pour une pile à combustible. Le paramètre le plus important d'une pile à combustible est sa composante résistive. La résistance électrolyte est la principale composante de la résistance totale de la pile à combustible. La résistance de polarisation modélise la résistance équivalente à la réaction, et la capacité double couche modélise les interfaces anode / électrolyte / cathode. Plus la résistance totale de la pile à combustible est faible, plus la perte d'énergie est faible et plus son rendement est élevé. Avec une génération d'énergie allant du kW au MW, une résistance totale excessivement élevée peut empêcher un système de piles à combustible de délivrer sa puissance maximale.

La difficulté avec la mesure de résistance d'une pile à combustible est due au fait que la source de tension de la pile ne peut pas être isolée des composants résistifs comme pourrait le suggérer le modèle du circuit. Contrairement à l'utilisation d'une mesure de résistance DC traditionnelle, la mesure de résistance d'une pile à combustible nécessite une mesure AC ou une mesure pseudo-AC. Dans chaque cas, une perturbation, un ΔI, est créé par les résultats de charge en tant que ΔV (ΔU) le long de la pile à combustible ; et la résistance de la pile à combustible , R = ΔV (ΔU) / ΔI.

* "Pile à combustible" et "système de piles à combustible" seront utilisés de manière interchangeable dans la note d'application.

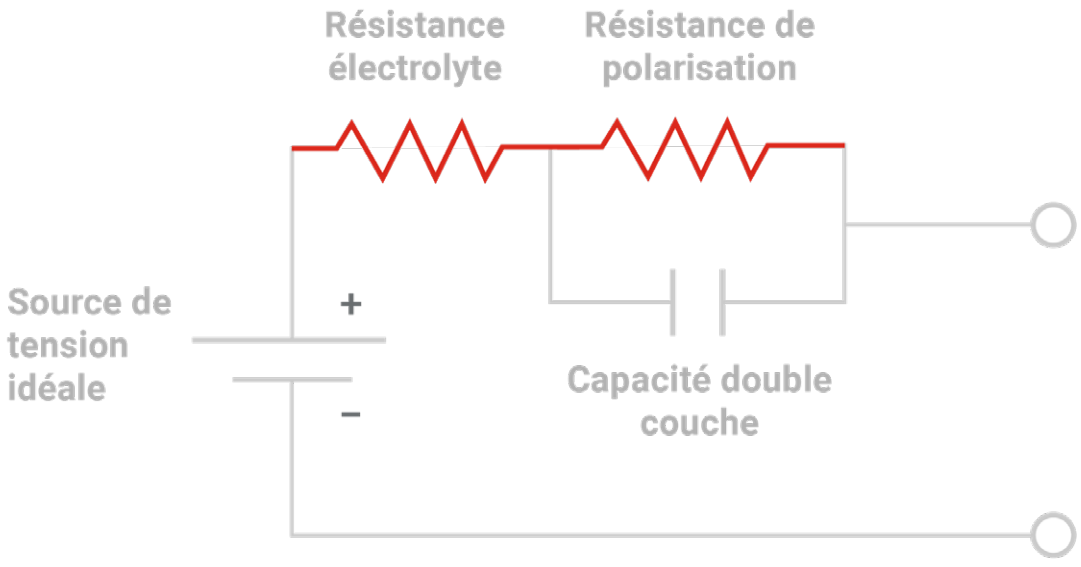
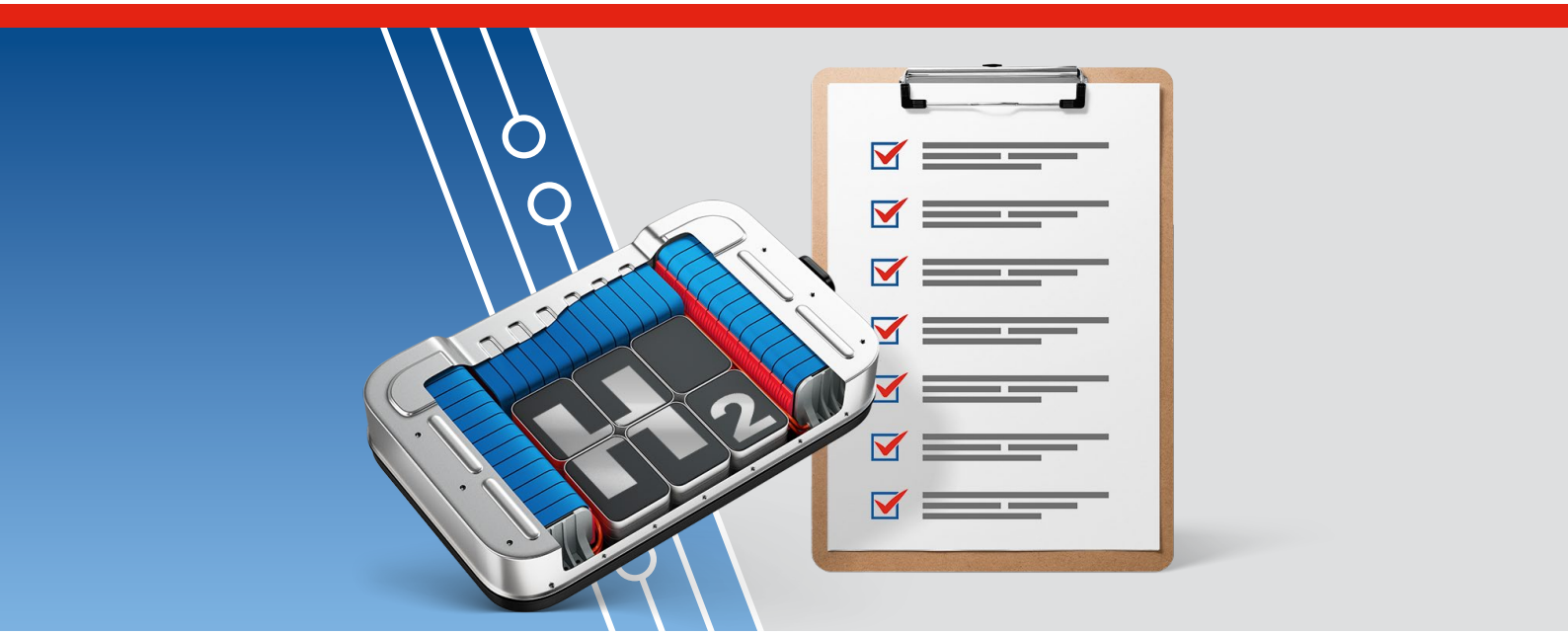


Figure 2
Modèle simplifié d'une pile à combustible



La mesure pseudo-AC est connue comme la méthode d'interruption de courant. Cette méthode, comme son nom l'indique, crée un ΔI en commutant instantanément le courant de charge d'une valeur d'état stable à 0 A. La tension de la pile à combustible augmente jusqu'à sa tension de circuit ouvert depuis la tension réduite par le produit du courant de charge et de la résistance de la pile à combustible. La Figure 3 montre une impulsion de tension consécutive à la coupure momentanée du courant. Alors que seule une charge électronique est nécessaire pour cette méthode, elle a le désavantage de créer une large perturbation sur la pile.

La Figure 3 montre une tension idéale pour l'illustration, mais l'inductance des câbles, L·di/dt, crée une oscillation sur les fronts d'impulsions en tension lors des transitions en courant. Cela peut rendre difficile l'obtention d'une lecture précise de la crête en tension. Le fait de garder les câbles de test entre la charge et la pile à combustible sous test aussi courts que possible peut réduire l'effet d'oscillation. La Figure 4 montre la configuration de test pour le test d'interruption de courant. Le second désavantage de cette méthode est qu'elle surestime la résistance de la pile à combustible de 10 à 20%.

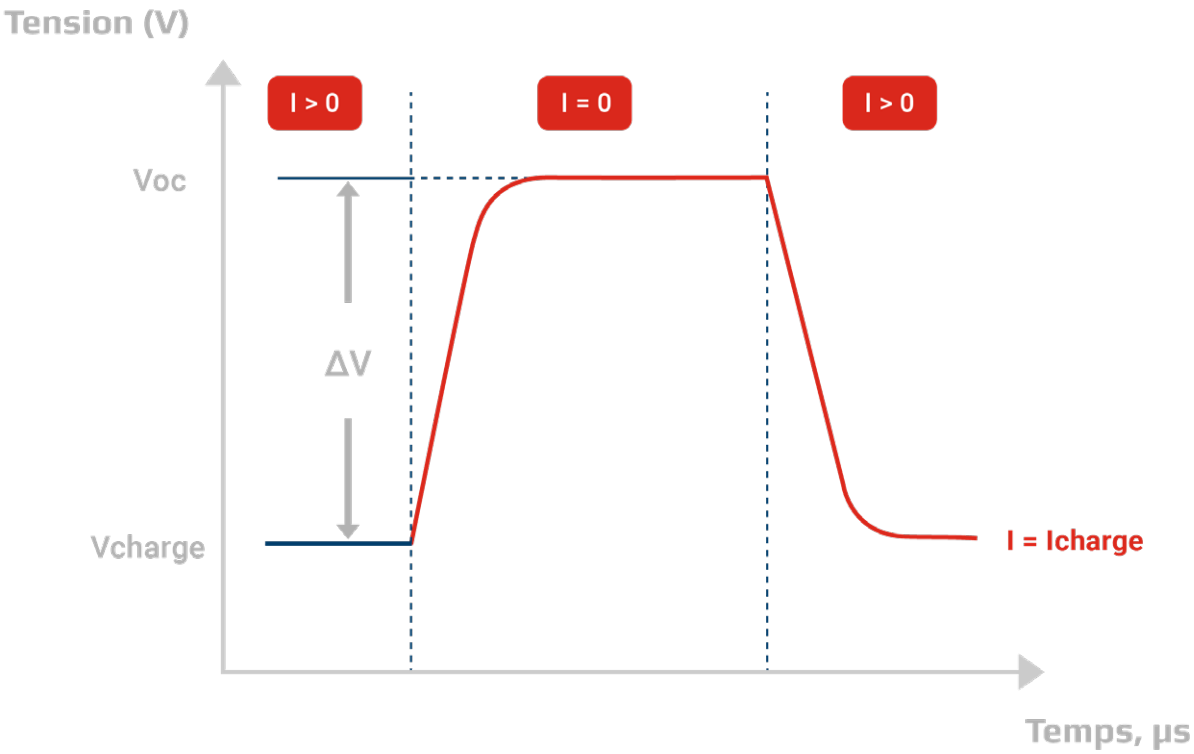
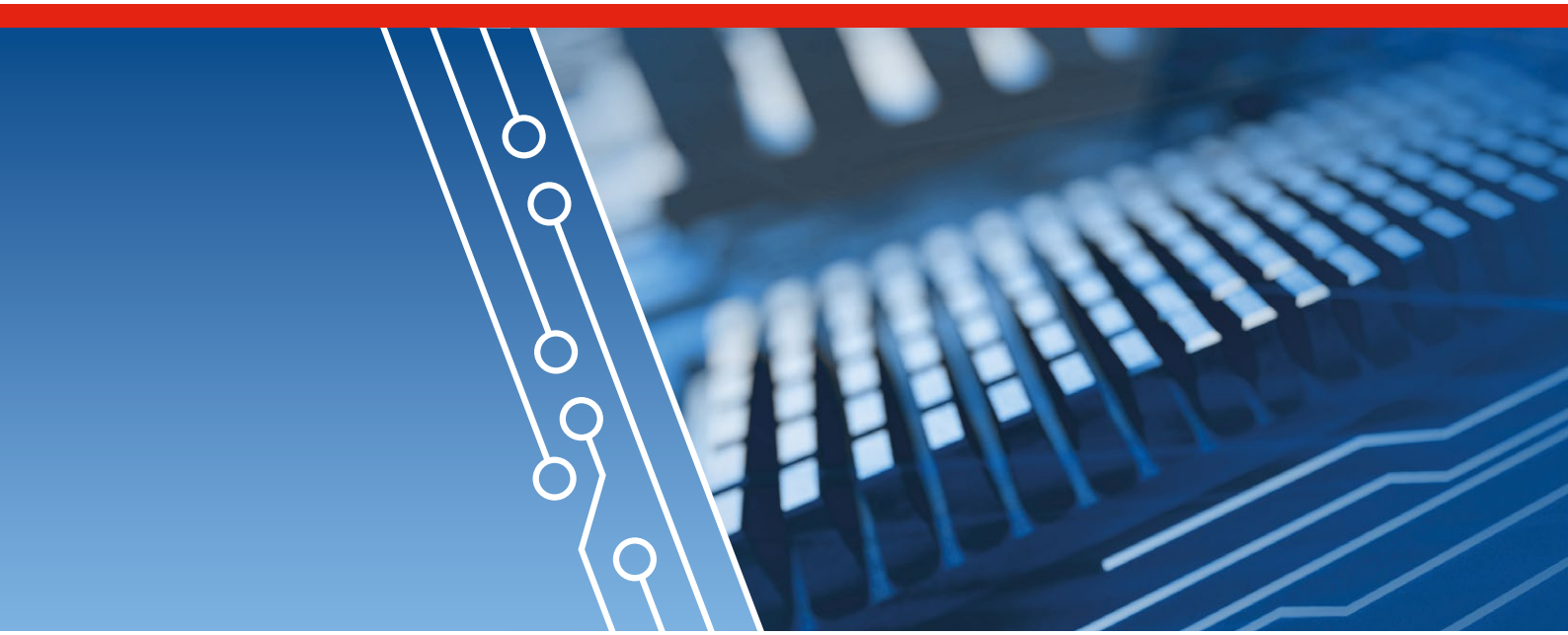


Figure 3
Une réponse de pile à combustible idéale pour une interruption de courant de charge. La sortie actuelle aurait une oscillation sur les fronts montant et descendant de l'impulsion en tension du fait de l'inductance du câblage. La transition est un effet AC donc les câbles agissent comme une ligne de transmission R-L-C au cours de la transition de la charge.



NOTE 1 Utiliser une mesure à distance 4 fils (câblage Kelvin) pour des mesures plus précises de la tension de sortie de la pile à combustible et pour éliminer la mesure de la chute de tension due au courant dans les lignes de source. Le système 2 fils mesurerait une tension plus faible.

NOTE 2 Entrelacer les cordons de mesure à distance et les séparer des cordons de source afin de réduire le couplage inductif du bruit dans les lignes sense.

NOTE 3 Garder les cordons de test aussi courts que possible pour réduire l'effet d'oscillation de la ligne de transmission lorsqu'un changement de charge se produit.

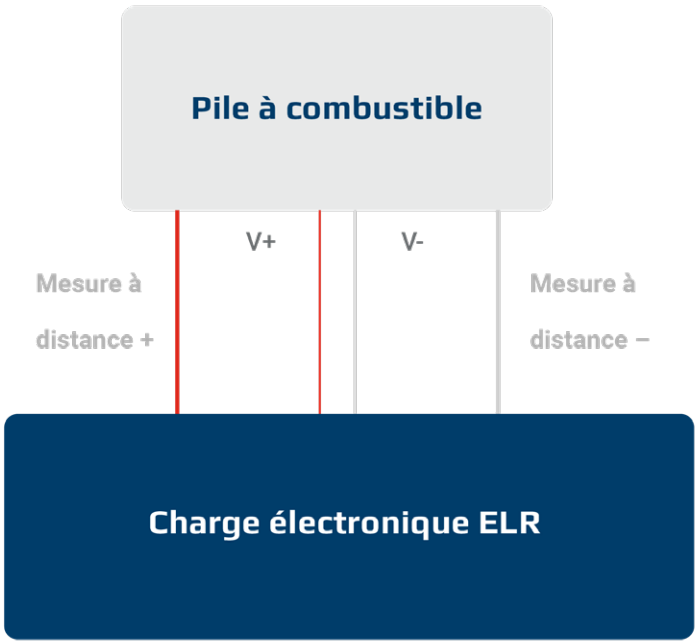


Figure 4
Configuration de test pour la mesure de résistance d'une pile à combustible avec la méthode d'interruption de courant

Le logiciel EA Elektro-Automatik Power Control qui contrôle les alimentations et les charges électroniques EA simplifie la tâche de création de l'onde sinusoïdale sur la charge DC. La capture d'écran, illustrée en Figure 5, affiche la création d'une onde sinus de 1 kHz avec une amplitude de 5 Vrms. Aucun codage n'est nécessaire pour le logiciel Power Control. Si la charge électronique doit être intégrée dans un autre logiciel de contrôle, la bibliothèque des commandes SCPI de la charge fournit le contrôle et la communication de l'instrument. Le Tableau 1 liste les commandes qui devraient générer l'onde sinus. Les commandes SCPI peuvent être codées en tant que commandes de lecture ou d'écriture dans des langages de programmation tels que C et Python.

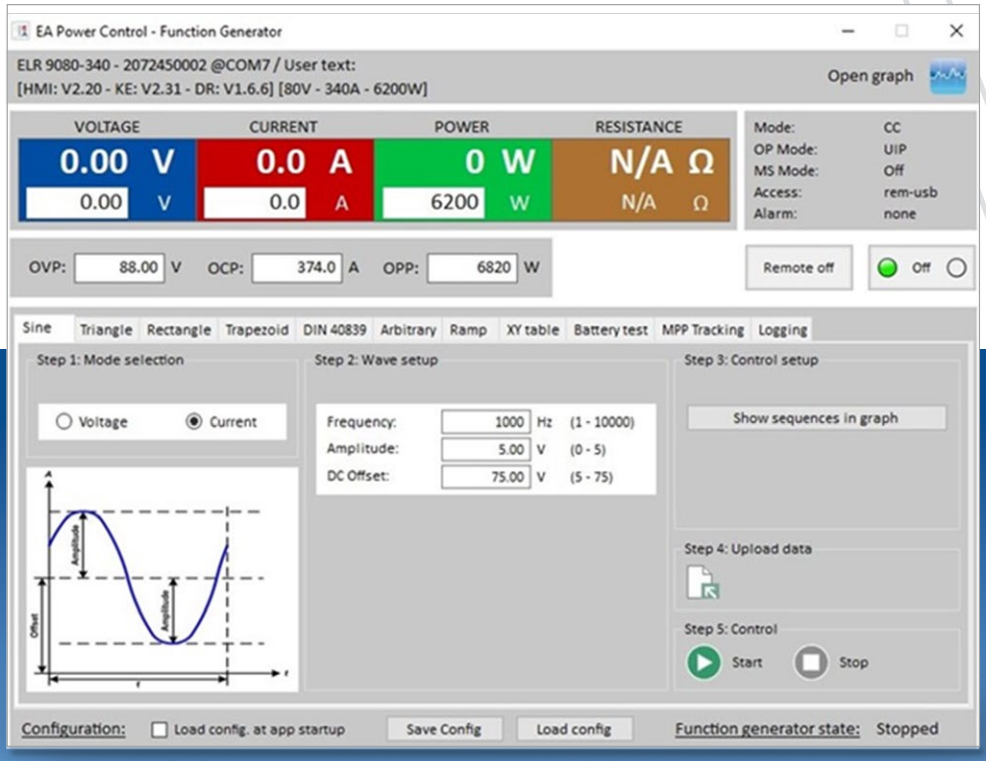


Figure 5
Capture d'écran du logiciel Power Control créant une onde sinus 5 V_{RMS} à 1 kHz sur une charge 75 A_{DC}

Étant donné que l'appareil est déjà en contrôle à distance et que l'entrée DC ou la sortie DC est désactivée, la séquence de commande suivante serait nécessaire :

```
FUNC:GEN:SEL CURR          ;SELECTS ARBITRARY GENERATOR FOR CURRENT.
FUNC:GEN:WAVE:LEV 1        ;SELECTS STEP 1
FUNC:GEN:WAVE:IND 5        ;SELECTS BEGINNING AC OFFSET CURRENT VALUE
FUNC:GEN:WAVE:DATA 75      ;SETS AC OFFSET CURRENT START VALUE OF 75A
FUNC:GEN:WAVE:IND 6        ;SELECTS ENDING AC OFFSET CURRENT VALUE
FUNC:GEN:WAVE:DATA 75      ;SETS ENDING AC OFFSET CURRENT VALUE OF 75A
FUNC:GEN:WAVE:IND 2        ;SELECTS BEGINNING AC FREQUENCY
FUNC:GEN:WAVE:DATA 1000    ;SETS BEGINNING AC FREQUECY OF 1KHZ
FUNC:GEN:WAVE:IND 3        ;SELECTS ENDING AC FREQUENCY
FUNC:GEN:WAVE:DATA 1000    ;SET ENDING AC FREQUENCY TO 1KHZ
FUNC:GEN:WAVE:IND 0        ;SELECTS BEGINNING AC AMPLITUDE
FUNC:GEN:WAVE:DATA 5       ;SETS BEGINNING AC AMPLITUDE OF 5A
FUNC:GEN:WAVE:IND 1        ;SELECTS ENDING AC AMPLITUDE
FUNC:GEN:WAVE:DATA 5       ;SET ENDING AC AMPLITUDE OF 5A
FUNC:GEN:WAVE:IND 7        ;SELECTS DURATION OF STEP IN SECONDS
FUNC:GEN:WAVE:DATA 10      ;SETS DURATION OF STEP TO BE 10 SECONDS
FUNC:GEN:WAVE:END 1        ;SET START SEQUENCE STEP TO 1
FUNC:GEN:WAVE:START 10     ;SET END SEQUENCE STEP TO 10
```

Tableau 1
Code SCPI pour créer l'onde sinusoïdale 5 V_{RMS} à 1 kHz sur un décalage de charge de 75 A_{DC}

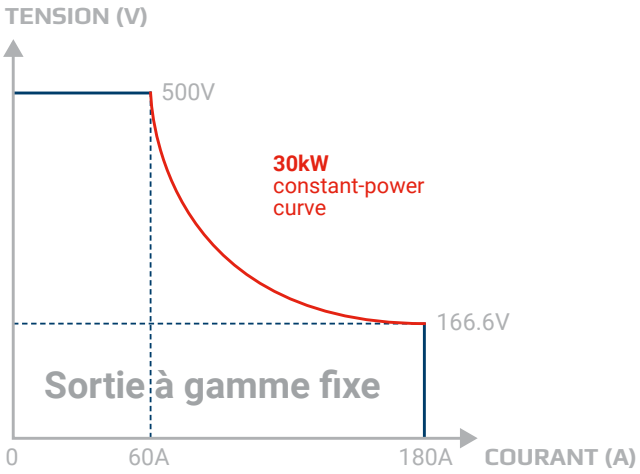


Figure 6
Entrée à changement de gamme automatique comparée à une charge fixe. On remarque une tension d'entrée et une puissance plus élevées aux réglages de courant plus élevés proposés par la charge à gamme automatique.

Un test de système de piles à combustible pouvant délivrer des niveaux de puissance de l'ordre des MW nécessite une instrumentation haute puissance. Les modèles de charges ELR peuvent récupérer jusqu'à 30 kW et fonctionnent avec des tensions maximales de 2000 V et des courants de 1000 A. Les charges ont cette capacité du fait de leur entrée à changement de gamme automatique présentée en Figure 6. Le changement de gamme automatique permet à la charge d'absorber la pleine puissance sur une gamme de fonctionnement plus large que celle d'une charge à gamme fixe et évite de devoir utiliser une charge plus grosse pour récupérer des tensions ou des courants supérieurs. Le changement de gamme automatique fournit également plus de flexibilité pour le test de plus de types de piles à combustible du fait des gammes de fonctionnement en tension et en courant plus larges de la charge.

Pour les grands systèmes de piles à combustible utilisés pour la génération d'énergie de secours, jusqu'à 64 charges ELR peuvent être mises en parallèle pour récupérer jusqu'à 64 kA. Les charges ELR assemblées peuvent tester n'importe quel système de piles à combustible.

Test de la Performance de la pile à combustible

Une fois que les paramètres d'un système de piles à combustible sont caractérisés, les ingénieurs peuvent quantifier la performance de sortie de la pile à combustible. Pour des données répétables, la pile à combustible devra être dans un environnement contrôlé au sein duquel la température, la pression, l'humidité et le débit de carburant de la pile à combustible sont maintenus constants. La tension de sortie est déterminée comme une fonction de courant de charge. Le courant de charge débute sans charge pour permettre la mesure de la tension de circuit ouvert. La charge est augmentée par un palier fixe jusqu'à ce que la tension de sortie de la pile à combustible chute d'environ 20 % de la tension de circuit ouvert. Chaque changement de courant de charge nécessite que la pile à combustible rétablisse des conditions d'équilibre ; ainsi, un délai est nécessaire avant la prise de données à chaque nouveau niveau de charge. La Figure 7 montre un exemple d'une courbe de polarisation.

Section 1 les effets électrocinétiques non linéaires engendrent une chute de tension non linéaire avec augmentation du courant de charge.

Section 2 la résistance ohmique de la pile à combustible domine la caractéristique de celle-ci et génère un segment linéaire.

Section 3 la tension chute de manière exponentielle car l'énergie est consommée plus rapidement que l'hydrogène et les réactions chimiques avec l'oxygène peuvent à nouveau fournir de l'énergie.

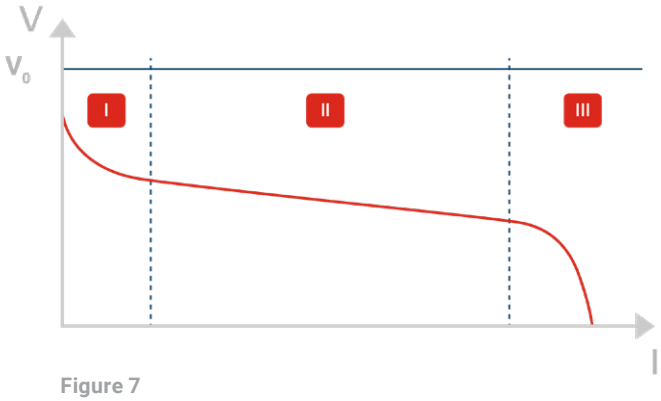


Figure 7
Courbe de sortie tension / courant de la pile à combustible

Les charges ELR peuvent facilement créer une séquence d'étapes de courant de charge en utilisant le logiciel Power Control ou les commandes SCPI.

La Figure 8 montre le logiciel Power Control avec une configuration qui augmente le courant de charge de 0 A à 100 A avec des étapes de 10 A. La figure indique la seconde étape de la séquence dans laquelle le courant de charge est augmenté de 10 A à 20 A. Le Tableau 2 montre les commandes SCPI qui réalisent la même étape du test de charge.

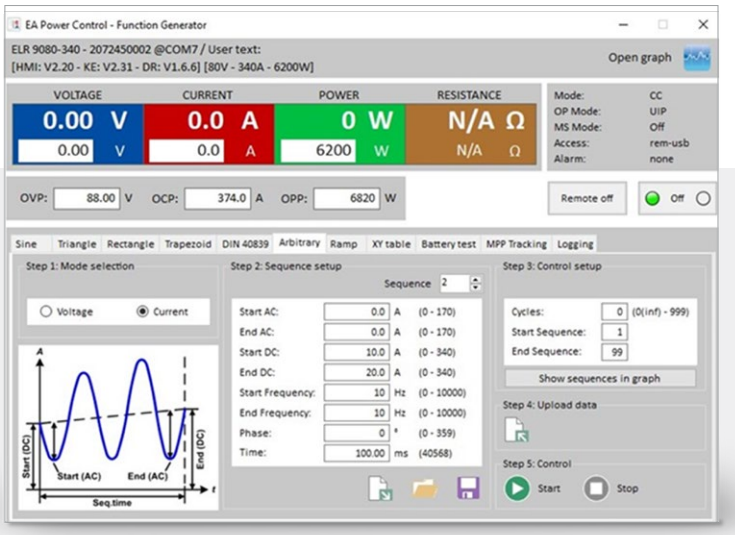


Figure 8
Utiliser le logiciel Power Control pour créer une séquence d'étapes de courant de 0 A à 100 A.

```
FUNC:GEN:SEL CURR          ;SELECTS ARBITRARY GENERATOR FOR CURRENT
.                          ;STEP ONE SKIPPED TO SHOW STEP 2 ONLY
.
.
FUNC:GEN:WAVE:LEV 2        ;SELECTS STEP 2
FUNC:GEN:WAVE:IND 5        ;SELECTS BEGINNING DC CURRENT VALUE
FUNC:GEN:WAVE:DATA 10      ;SETS DC CURRENT START VALUE OF 10A
FUNC:GEN:WAVE:IND 6        ;SELECTS ENDING DC CURRENT VALUE
FUNC:GEN:WAVE:DATA 20      ;SETS ENDING DC CURRENT VALUE OF 20A
FUNC:GEN:WAVE:IND 7        ;SELECTS DURATION OF STEP IN SECONDS
FUNC:GEN:WAVE:DATA 10      ;SETS DURATION OF STEP TO BE 10 SECONDS
.                          ;SKIP STEPS 3-10 WHICH INCREMENT UP 10A EACH
.
.
FUNC:GEN:WAVE:END 1        ;SET START SEQUENCE STEP TO 1
FUNC:GEN:WAVE:START 10     ;SET END SEQUENCE STEP TO 10
```

Tableau 2
Partie du code SCPI pour créer l'étape de séquence de 0 A à 100 A. L'étape 2 des 10 étapes est illustrée.

Test de durabilité de la pile à combustible

L'étape la plus importante dans le test des piles à combustible est de garantir leur sécurité et leur stabilité. Pour les applications automobiles, un système de piles à combustible doit avoir une durée de vie de 5000 heures. Les systèmes d'alimentation de secours doivent avoir une autonomie de 10000 heures. Le test réalisable nécessite des tests de contraintes accélérés dans lesquels un système de pile à combustible subit des cycles d'étapes de changement de charge ou des rampes de courant de charge pendant 100 heures.

Le changement du courant de charge engendrerait une modification de la tension de la pile à combustible d'environ 50 %. La période de changement d'étape de l'onde carrée et le cycle de rampe seraient d'environ 50 s.

En utilisant le générateur de formes d'ondes intégré, les ELR chargent le logiciel Power Control, illustré en Figure 9, et peuvent configurer un test de rampe avec une rampe ayant une période de 50 s. Le code SCPI équivalent est donné dans le Tableau 3.

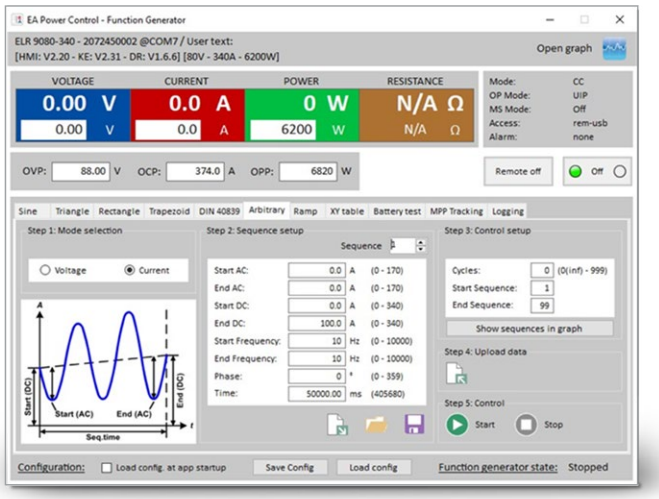


Figure 9
Capture d'écran du logiciel Power Control montrant la création d'une rampe de courant de charge de 0 A à 100 A avec une période de 50 s.

```
FUNC:GEN:SEL CURR          ;SELECTS ARBITRARY GENERATOR FOR CURRENT
FUNC:GEN:WAVE:LEV 1        ;SELECTS STEP 1
FUNC:GEN:WAVE:IND 0        ;SELECTS BEGINNING DC CURRENT VALUE
FUNC:GEN:WAVE:DATA 0       ;SETS DC CURRENT START VALUE OF 0A
FUNC:GEN:WAVE:IND 6        ;SELECTS ENDING DC CURRENT VALUE
FUNC:GEN:WAVE:DATA 100     ;SETS ENDING DC CURRENT VALUE OF 100A
FUNC:GEN:WAVE:IND 7        ;SELECTS DURATION OF STEP IN SECONDS
FUNC:GEN:WAVE:DATA 50      ;SETS DURATION OF STEP TO BE 50 SECONDS
FUNC:GEN:WAVE:END 1        ;SET START SEQUENCE STEP TO 1
FUNC:GEN:WAVE:START 1      ;SET END SEQUENCE STEP TO 1
```

Table 3
Code SCPI qui crée une rampe équivalente à la rampe définie en Figure 9.

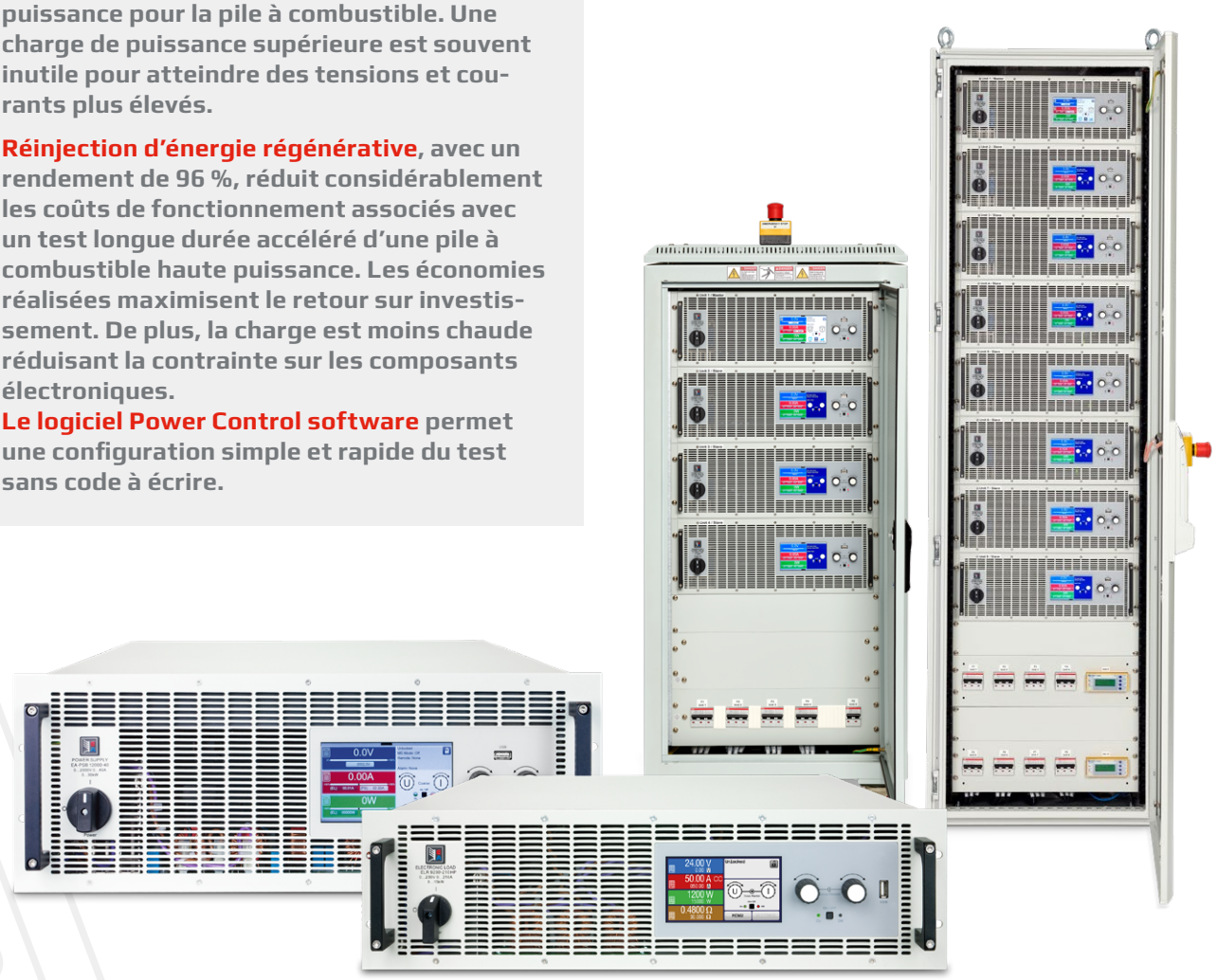
Un test de 100 heures sur un système de piles à combustibles haute puissance consomme beaucoup d'énergie. Les charges ELR peuvent économiser une énergie substantielle au cours d'un test de contrainte accéléré. Les charges possèdent une réinjection d'énergie régénérative qui peut récupérer l'énergie et la réinjecter sur le réseau local avec un rendement de 96 %. Ne pas dissiper toute l'énergie consommée permet aux charges ELR de créer moins de chaleur que les charges traditionnelles. Ces charges nécessitent un investissement plus faible pour l'infrastructure de refroidissement. L'utilisation d'une charge ELR fournit un retour sur investissement avec des coûts de fonctionnement considérablement réduits.

Test simplifié et efficace d'une pile à combustible

Les charges ELR proposent les avantages suivants pour le test de piles à combustibles :

- **Le générateur de formes d'ondes intégré simplifie la configuration et le test des piles à combustible en éliminant le défi de l'interfaçage d'un générateur de formes d'ondes faible puissance au sein d'un circuit haute puissance. Avec le générateur de formes d'ondes, les charges ELR peuvent facilement programmer des variations sinusoïdales sur un courant de charge DC pour créer des perturbations afin de mesurer la résistance de la pile. Le générateur de formes d'ondes peut aussi créer des ondes carrées et des rampes pour les tests de performance et de durabilité.**
- **Le changement de gamme automatique permet de réduire le coût de la charge nécessaire car les niveaux de tension et courant supérieurs permettent l'optimisation de la puissance pour la pile à combustible. Une charge de puissance supérieure est souvent inutile pour atteindre des tensions et courants plus élevés.**
- **Réinjection d'énergie régénérative, avec un rendement de 96 %, réduit considérablement les coûts de fonctionnement associés avec un test longue durée accéléré d'une pile à combustible haute puissance. Les économies réalisées maximisent le retour sur investissement. De plus, la charge est moins chaude réduisant la contrainte sur les composants électroniques.**
- **Le logiciel Power Control software permet une configuration simple et rapide du test sans code à écrire.**

Alors que cette note d'application s'est concentrée sur la charge ELR comme instrument de test au primaire, la série d'alimentations bidirectionnelles PSB peut fournir la même capacité de charge. Comme les charges ELR, les alimentations de la série PSB possèdent un générateur de formes d'ondes intégré, une entrée et une sortie à gamme automatique, et une réinjection d'énergie régénérative. Les alimentations PSB peuvent également simuler un système de piles à combustible si le test de charge d'une pile ainsi que de la pile est nécessaire. Voir la note d'application AN024 pour plus de détails sur la simulation d'une pile à combustible avec les alimentations bidirectionnelles PSB. Quel que soit l'appareil sélectionné, tous proposent un test efficace et simple des piles à combustible.



DISPONIBLE POUR VOUS DANS LE MONDE ENTIER.

Au siège social en Allemagne, au centre industriel de Rhénanie du Nord Westphalie, plus de 200 employés qualifiés, sur une usine de 18000 m², recherchent, développent et fabriquent des équipements de pointe tels que des alimentations de laboratoire, des adaptateurs secteur haute puissance et des charges électroniques avec ou sans réinjection d'énergie. Le réseau commercial inclut des antennes en Chine et aux USA, ainsi que des bureaux en Russie et en Espagne, avec un large réseau de partenaires.

www.elektroautomatik.com