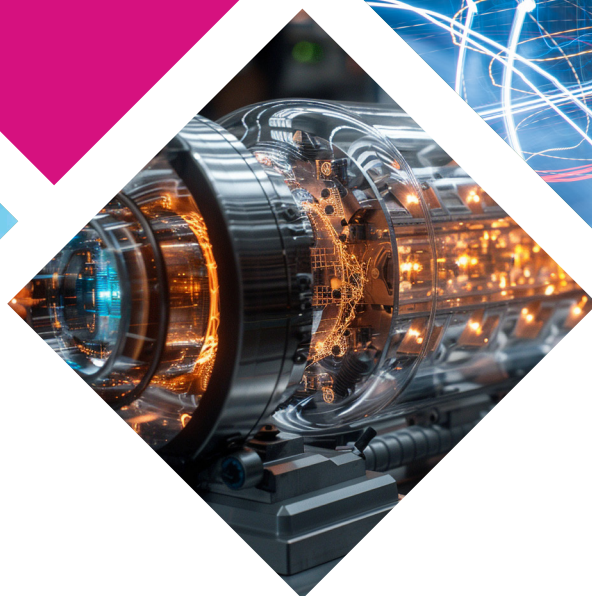
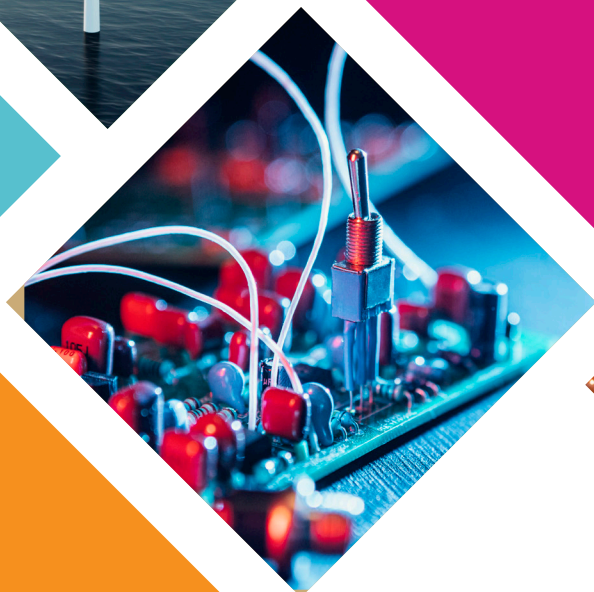




Les voix de la recherche

Projet CTAF avec Emmanuel Hoang
& Adrien Voldoire



6

chercheurs

160k€

investissement SATT

2

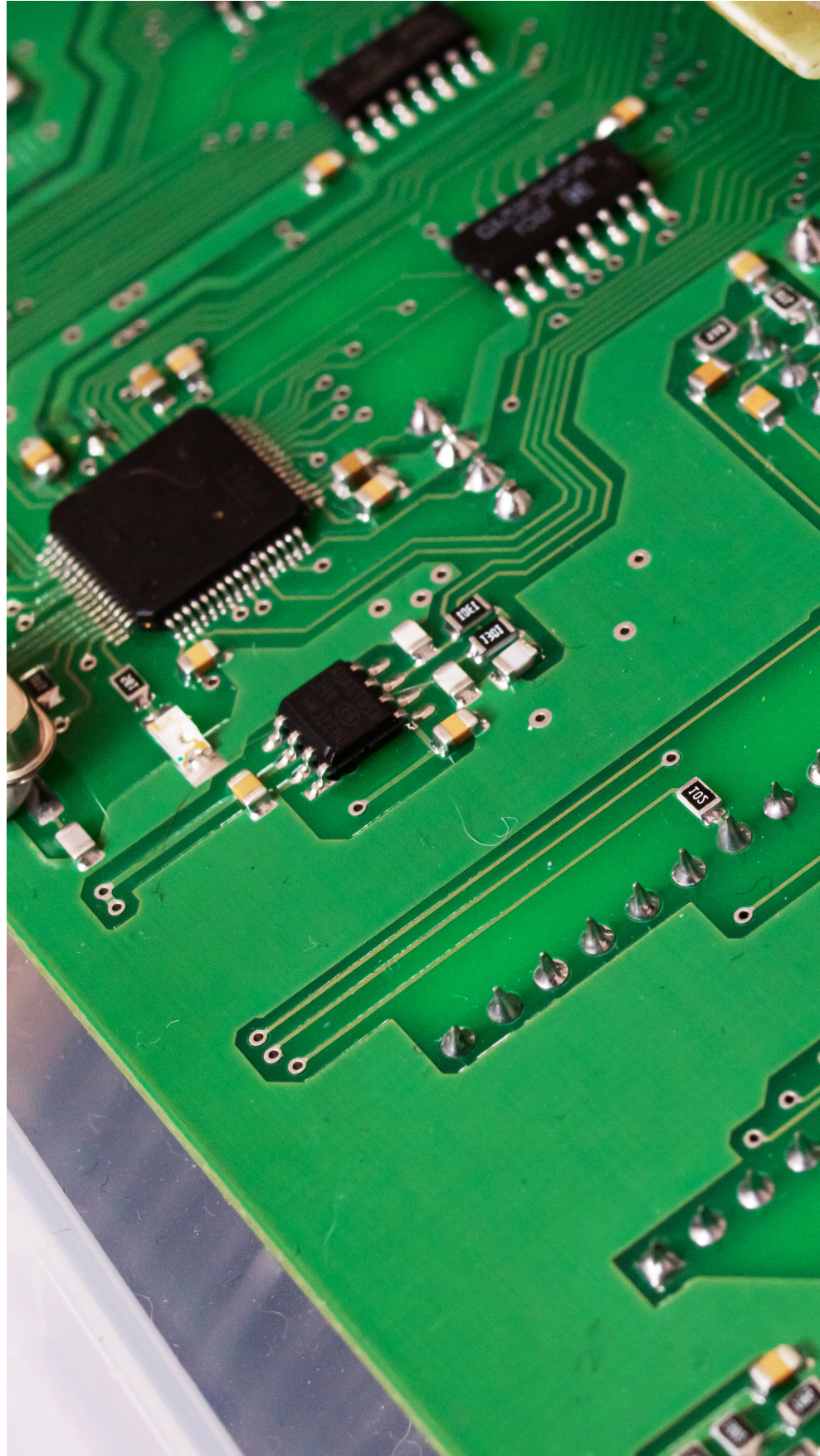
brevets déposés

5kW

Preuve de Concept à
une puissance de 5kW

8,5M USD

marché mondial des avions
VTOL en 2021 et qui devrait
atteindre 30,8 milliards USD
d'ici 2030



sur les machines électriques intégrées dans leur environnement.

Emmanuel Hoang est enseignant, professeur agrégé au DER SIEN de l'ENS Paris-Saclay¹. Spécialiste des architectures électriques et de la gestion de l'énergie, il apporte son expertise, acquise après plus de trois décennies de travaux de recherche menées au laboratoire SATIE²,



l'onduleur modulaire et l'optimisation du système.

Adrien Voldoire est chercheur au laboratoire GEEPS, rattaché à CentraleSupélec, au CNRS et à l'Université Paris-Saclay. Expert en électronique de puissance et en conversion d'énergie, il conçoit des systèmes robustes et performants. Dans CTAF, il intervient sur

Depuis 2016, une équipe de chercheurs français travaille sur CTAF, une nouvelle chaîne de traction électrique qui promet de transformer la mobilité lourde et la production d'énergie décarbonée.

Grâce à une architecture innovante qui peut être basse tension, est modulaire et

résiliente, CTAF vise à rendre les motorisations électriques plus puissantes, plus sûres et plus faciles à maintenir. Avec l'accompagnement et le financement en maturation de la SATT Paris-Saclay, le projet entre aujourd'hui dans une phase clé avec la mise en place d'un banc de test.

CTAF : repenser le moteur électrique pour plus de puissance, modularité & sécurité

SATT Paris-Saclay :
Quelles limitations des motorisations électriques actuelles vous ont poussé à imaginer une nouvelle architecture de chaîne de traction ?

Adrien Voldoire :

Le projet a commencé en 2016, à un moment où l'électrification de la mobilité commençait à s'accélérer. L'idée générale était de produire et de stocker de plus en plus d'énergie électrique pour les systèmes embarqués. Mais pour augmenter la puissance électrique dans un véhicule ou un avion, il fallait des batteries de plus en plus importantes, donc de haute tension. À l'époque, on parlait souvent de 800 volts. Le problème est que ces hautes tensions posent plusieurs difficultés. Il y a bien sûr un enjeu de sécurité.

Mais il y a aussi des problèmes techniques : par exemple, en altitude, la baisse de pression peut provoquer des décharges partielles. Ce sont des questions critiques, notamment pour l'aéronautique.

Pour répondre à cela, les co-auteurs du brevet, Emmanuel Hoang et Éric Labouré du laboratoire GeePs³, ont imaginé une chaîne d'entraînement basse tension, autour de 48 volts. C'est intéressant parce que cette tension est sécurisée pour l'utilisateur, on peut en théorie toucher le système sans danger. Mais ce n'est pas tout : cette architecture permet aussi d'obtenir une forte puissance, ce qui est un vrai avantage compétitif. Peu d'autres inventions peuvent le proposer.

Emmanuel Hoang :

Il faut ajouter une précision sur les batteries et les sources d'énergie.

Quand on parle de batteries, le terme exact est accumulateur, et toutes les sources embarquées – batteries, piles à combustible ou supercondensateurs – sont des éléments électrochimiques à très basse tension, quelques volts seulement. Pour obtenir une tension continue haute, il faut mettre ces éléments en série. Et là, se sont posés des problèmes physiques : les caractéristiques de chaque élément ne sont pas identiques, et cette dispersion crée de grandes difficultés techniques. Pour que tout fonctionne correctement, il faut des systèmes électroniques complexes, appelés BMS (Battery Management System). Ces systèmes sont coûteux, difficiles à mettre au point, et représentent un vrai défi scientifique et technique pour les systèmes embarqués.

A.V. :

Les limitations, donc, sont multiples. Quand on augmente la puissance électrique embarquée, il faut :

- augmenter la puissance massique (la quantité de puissance par unité de masse),

- assurer la résilience du système, notamment en aéronautique, où le court-circuit est critique.

Les systèmes triphasés classiques ne sont pas résilients : si l'on perd une phase, le système s'arrête. C'est à partir de ces constats que nous avons proposé le brevet CTAF, qui répond à ces limitations.

E.H :

En 2016, il y avait aussi la question de la réparabilité. Sur un système classique, un défaut d'une phase stoppe tout. Comment maintenir un fonctionnement continu dans ces conditions ? CTAF répond à ce besoin, grâce à sa modularité. On peut continuer à fonctionner et réparer ou remplacer des modules défectueux. Les deux points-clés sont donc : les limites physiques des éléments électrochimiques mis en série et la réparabilité globale du système.

SATT Paris-Saclay : La résilience et la modularité distinguent-elles CTAF des solutions actuelles ?

A.V :

Oui, mais il y a encore d'autres éléments. Comme je l'ai dit, le système basse tension simplifie l'intégration des sources d'énergie. La modularité offre aussi de nouveaux degrés de liberté. Pour préciser, CTAF repose sur un système de machines fractionnées avec électronique de puissance fractionnée. L'électronique de puissance est le seul élément que l'on peut commander électriquement dans un système électrique. En la fractionnant, on a beaucoup plus de liberté pour piloter le système : chaque module a ses propres interrupteurs et variables de commande. Cela permet d'adopter des lois de commande plus avancées, d'augmenter les performances et de mieux gérer le flux d'énergie.

Nous avons décidé de passer au niveau suivant, c'est-à-dire de montrer que le système peut répondre à un cahier des charges d'un industriel, avec plus de puissance et plus de modules.

En plus, CTAF peut interfacier différentes sources d'énergie – batteries, piles à combustible, supercondensateurs – même si elles ont des tensions ou des flux différents. On crée un nœud énergétique, où la machine joue le rôle de gestionnaire central pour harmoniser les flux et optimiser l'utilisation de chaque source.

E.H :

Pour ajouter un contexte historique, la machine électrique dans les systèmes classiques était soit au début de la chaîne pour produire de l'électricité, soit à la fin pour la propulsion. Grâce aux travaux de notre équipe et à la thèse d'Antoine Cizeron, maintenant chercheur au laboratoire Ampère⁴, nous avons montré qu'avec CTAF, il est possible d'intégrer la machine dans le système électrique, ce qui représente une source majeure d'innovation.

SATT Paris-Saclay : Quels premiers résultats attendez-vous du banc de test, et quelles performances clés cherchez-vous à valider ?

A.V :

Si l'on reprend l'historique, après le brevet, nous avons réalisé une preuve

de concept très bas niveau, ce qu'on appelle un TRL très faible. Cela voulait dire qu'on n'était pas au niveau 3 d'une preuve de concept classique. La manip était de très faible puissance, expérimentale, et le système n'était pas représentatif d'une application réelle. Par exemple, nous avons utilisé les machines synchrones disponibles dans le laboratoire pour cette première démonstration. Entre 2018 et 2022, la thèse d'Antoine Cizeron a permis de mettre en œuvre le brevet et de montrer que ça fonctionne. À partir de cette thèse, nous avons décidé de passer au niveau suivant, c'est-à-dire de montrer que le système peut répondre au cahier des charges d'un industriel, avec plus de puissance et plus de modules. C'est pour cela que nous avons démarré un programme Poc'Up, accompagné de la réception d'un banc de test 5 kW. Le banc expérimental a plusieurs objectifs :

- monter en maturité technologique, pour montrer que CTAF peut répondre aux besoins industriels.
- monter en puissance, afin de se rapprocher des applications réelles que l'on rencontre dans les cahiers des charges des industriels.

- augmenter le niveau de fractionnement, car la première manip était limitée à un fractionnement égal à 3. Cela posait parfois des confusions avec le système triphasé classique, mais maintenant, avec un fractionnement de 12, nous voulons démontrer que le brevet peut être fortement fractionné, ce qui permet d'augmenter la puissance tout en restant en basse tension (48 volts), sur un cahier des charges de 5 kW.

Là où nous avons une vraie valeur ajoutée, c'est la résilience : même en cas de court-circuit ou de débranchement d'un module, le système continue de fonctionner.

E.H :

Au départ, nous avons travaillé avec les moyens du laboratoire. Nous avons pris une machine disponible et nous avons fractionné l'électronique de puissance avec le personnel et le matériel que nous avons. Le premier fractionnement s'est arrêté à 3 modules parce que 2 n'était pas généralisable. Avec le Poc'Up, Adrien et l'équipe ont calculé le niveau de fractionnement optimal, par exemple pour optimiser le rendement énergétique de la chaîne de conversion.

Le chiffre 12 n'a pas été choisi au hasard : il provient de simulations numériques basées sur nos modèles. Le banc de test permettra également de valider ces modèles de simulation.

A.V :

En termes de performances, nous voulons montrer que CTAF peut atteindre des rendements comparables aux chaînes de traction actuelles, ce qui reste très satisfaisant. Mais là où nous avons une vraie valeur ajoutée,

c'est la résilience : même en cas de court-circuit ou de débranchement d'un module, le système continue de fonctionner. Nous pourrions aussi démontrer la capacité à interfacer différentes sources d'énergie à basse tension.

E.H :

Le problème qui pose le plus de difficultés aux industriels, c'est le court-circuit électrique. Grâce au concept CTAF, nous pouvons mieux gérer ces situations. Et économiquement, nos études montrent que le système n'est pas plus coûteux que l'état de l'art. D'ici la fin du programme Poc'Up, nous allons expérimenter les gains de rendement, et montrer d'autres avantages comme la facilité de maintenance et la modularité.

SATT Paris-Saclay : Aujourd'hui, vous cherchez à transférer le projet CTAF vers un industriel. Quel type de partenaire recherchez-vous, et à quel stade de développement souhaitez-vous l'impliquer ?

A.V :

Nous visons deux grandes familles d'industriels :

- la mobilité électrique de forte puissance, par exemple, avions hybrides ou électriques, drones VTOL (décollage et atterrissage vertical), trains non électrifiés, camions, bus et navires électriques. L'innovation permet de garantir un haut rendement à forte puissance, grâce au fractionnement et à la modularité.
- la production d'électricité décarbonée, par exemple les fermes éoliennes flottantes ou l'hydroélectricité modulable.

E.H :

Prenons le ferroviaire : certaines lignes non électrifiées nécessitent encore des moteurs diesel-électriques. Les Allemands, par exemple, cherchent à remplacer ces diesels par des piles à combustible, mais ces piles nécessitent de la haute tension et ne supportent pas bien les régimes transitoires. CTAF permet de fonctionner à basse tension, tout en intégrant batteries et supercondensateurs pour leur gestion.

A.V :

Nous voulons intégrer un industriel pour passer à une manipulation à échelle 100 kW, correspondant à un cahier des charges d'un industriel réaliste. Une création de start-up n'était pas envisagée : pour atteindre cette puissance, seuls des acteurs comme Safran, Airbus, Alstom, ABB peuvent industrialiser le concept.

E.H :

Pour une start-up, nous pourrions éventuellement envisager la formation et le transfert de connaissances, mais pas la production industrielle, car nous sommes chercheurs et ne pouvons pas fabriquer des systèmes au-delà de quelques kW.

SATT Paris-Saclay : Qu'attendez-vous exactement de la SATT Paris-Saclay et quel a été son apport le plus déterminant dans la trajectoire du projet CTAF ?

A.V :

La SATT Paris-Saclay est vraiment indispensable pour nous, parce que nous sommes des chercheurs et notre quotidien est centré sur la science et les expérimentations. Nous n'avons pas les compétences ni le temps pour gérer les aspects juridiques, économiques ou stratégiques.

Concrètement, la SATT nous a aidés à :

- structurer le projet, en nous aidant à identifier clairement la valeur du brevet et les applications industrielles possibles. Ce travail est essentiel car il faut constamment dialoguer entre les chercheurs et le monde industriel pour aligner la valeur scientifique sur les attentes du marché.
- financer le projet Poc'Up, avec une enveloppe de 160 000 €, presque entièrement dédiée au matériel. Nous avons réalisé les manipulations nous-mêmes, sans personnel supplémentaire, car nous n'avions pas les moyens d'engager des doctorants ou post-docs pour nous assister.
- gérer la propriété intellectuelle, un sujet complexe : CTAF repose sur un brevet initial et un second brevet est en cours de validation, avec comme inventeurs Antoine Cizeron, Javier Ojeda du Laboratoire SATIE et Olivier Béthoux du laboratoire GeePs, est en cours de validation. La SATT nous accompagne dans la stratégie de licence et dans la protection des inventions.
- préparer le transfert vers l'industrie, en nous mettant en relation avec des acteurs industriels et en planifiant la phase de Tech Transfer Program.

E.H :

Pour résumer, la SATT nous a permis de nous concentrer sur ce que nous savons faire de mieux : la recherche et le développement scientifique. Nous nous focalisons sur les expériences, les simulations et la mise en œuvre de l'innovation, tandis que la SATT prend en charge tout le reste : financement, gestion juridique et propriété intellectuelle, stratégie industrielle et relations avec les partenaires. C'est exactement ce que nous attendions depuis des années : une équipe qui nous permette de nous consacrer à notre cœur de métier tout en assurant la valorisation industrielle de nos travaux. Depuis le début de leur accompagnement, leur soutien s'est renforcé et nous permet d'avancer sereinement sur chaque aspect du projet, de la preuve de concept jusqu'à la préparation de l'industrialisation. Nous n'avons que des remerciements à adresser pour leur professionnalisme bienveillant.



Avec l'accompagnement et le financement en maturation de la SATT Paris-Saclay, le projet CTAF poursuit son développement technologique, avec la mise en œuvre d'un banc de test 5 kW et l'optimisation de sa modularité et de sa résilience. CTAF se positionne comme une innovation technique capable de gérer efficacement la forte puissance à tension maîtrisée, de faciliter la maintenance, d'intégrer différentes sources d'énergies, ainsi que de nouvelles fonctionnalités comme par exemple le contrôle actif des vibrations et des "balourds" électromagnétiques, tout en offrant un fonctionnement plus résilient.



¹: <https://sien.ens-paris-saclay.fr/>

²: <https://satie.ens-paris-saclay.fr/fr>

³: <https://www.geeps.centralesupelec.fr/>

⁴: <http://www.ampere-lab.fr/>