

Projets de recherche orientée en partenariat /
Développement durable du secteur minier - II – 2^e
concours

Rapport de vulgarisation scientifique

2022-OMN-301210

1. TITRE DU PROGRAMME ET CONCOURS

Programme : Projets de recherche orientée en partenariat / Développement durable du secteur minier - II

2. TITRE VULGARISÉ

Indiquez le titre du projet de recherche (doit être rédigé en français).

Titre du projet : Optimisation des génératrices diesel dans les sites miniers pour une meilleure efficacité à faible régime par l'hybridation pneumatique et l'intégration des énergies renouvelables.

3.1 MONTANT TOTAL DE L'OCTROI OBTENU

300 000 \$
381 000 \$ (incluant les frais indirects)

3.2 MONTANT TOTAL DU PROJET (incluant l'octroi obtenu par le FRQNT et la contribution des partenaires)

315 000 \$
606 000 \$ (incluant frais indirects FRQNT et les contributions en nature du partenaire)

4. RÉSUMÉ VULGARISÉ (doit être rédigé en français. Maximum 1 page).

Veuillez résumer, de façon vulgarisée, votre projet de recherche : introduction, méthodologie, résultats, conclusion.

Introduction

La réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) est un enjeu majeur pour lutter contre le changement climatique. Dans les sites miniers isolés, l'électricité est principalement produite par des génératrices diesel, entraînant une forte consommation de carburant et des émissions élevées. Ce projet vise à **optimiser l'efficacité énergétique des génératrices diesel** en intégrant une technologie innovante : **l'hybridation pneumatique**. Cette approche permet de récupérer et stocker l'énergie renouvelable excédentaire pour améliorer le fonctionnement des moteurs/génératrices et réduire leur empreinte carbone.

Méthodologie

Les génératrices diesel, comme celles utilisant le moteur Caterpillar C15 étudié dans ce projet, sont équipées de systèmes de suralimentation optimisés pour des régimes élevés, mais qui perdent en efficacité à faible charge. **L'hybridation pneumatique** est une technologie innovante qui permet d'améliorer les performances des moteurs diesel en utilisant de l'air comprimé pour optimiser la combustion. Elle permet d'augmenter le rendement des génératrices diesel, diminuer la consommation de combustible et l'émission des gaz à effet de serre en utilisant de l'énergie stockée de source renouvelable (éolien, solaire, etc.). Le stockage d'énergie utilisée pour l'hybridation pneumatique peut se faire sous forme électrique ou directement sous forme d'air comprimé dans un réservoir.

L'optimisation se fait en plusieurs étapes :

1. **Récupération et stockage d'énergie** : L'excès d'énergie produit par les sources d'énergies renouvelables (éolien, solaire) est stocké dans des batteries ou pour actionner un compresseur qui stocke de l'air comprimé.
2. **Injection d'air comprimé dans le moteur** : L'air stocké est injecté dans l'admission d'air du moteur diesel, ce qui permet d'**optimiser le mélange air-carburant** et d'améliorer l'efficacité de la combustion. Si le stockage est dans les batteries, nous utilisons un compresseur électrique pour fournir l'air comprimé pour l'hybridation.
3. **Réduction de la consommation de carburant** : Grâce à une combustion plus efficace, le moteur utilise **moins de diesel** pour produire la même puissance, réduisant ainsi la consommation de carburant.
4. **Optimisation de l'intégration des énergies renouvelables** : L'énergie excédentaire des sources renouvelables est stockée, permet d'éviter le gaspillage et stabiliser la production d'énergie en période de forte demande.

Principaux résultats

Cette technologie d'hybridation pneumatique a été validée par :

- Des tests expérimentaux réalisés sur un petit moteur diesel, qui ont confirmé l'amélioration de l'efficacité énergétique et la réduction des émissions grâce à l'hybridation pneumatique, en particulier à faible régime.
- En parallèle, des simulations numériques approfondies sur le moteur Caterpillar C15 avec le logiciel GT-Power, ont permis d'identifier des stratégies optimales pour maximiser les performances à faible régime.
- L'ajout d'air comprimé et l'amélioration de la combustion ont permis d'extraire plus d'énergie par unité de carburant, donc un meilleur rendement avec des économies de 15 à 60% selon les conditions d'opération.
- Une étude sur l'optimisation de la distribution variable des soupapes (VVT) a montré 13 % de réduction de la consommation spécifique de carburant à des régimes élevés, en optimisant la gestion de l'admission d'air.

Conclusion

Ce projet offre une solution technologique prometteuse pour les sites miniers isolés, en combinant efficacité énergétique et intégration des énergies renouvelables. En réduisant la dépendance aux carburants fossiles, l'hybridation pneumatique représente une avancée majeure vers une électrification plus durable des opérations minières. À terme, cette technologie pourrait être déployée à grande échelle pour décarboner les industries utilisant des génératrices diesel, améliorant ainsi leur compétitivité tout en réduisant leur impact environnemental.

Projets de recherche orientée en partenariat / Développement durable du secteur minier - II – 2^e concours

Rapport de vulgarisation scientifique

5. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET RETOMBÉES (doit être rédigé en français. Maximum ½ page).

1) Énoncer très brièvement les résultats attribuables directement aux travaux financés. 2) Décrire clairement, s'il y a lieu, toute(s) retombée(s) déjà observée(s) ou confirmée(s) qui découle des travaux, que ce soit sur le plan scientifique, économique, social, environnemental, politique, culturel, artistique ou technologique. 3) Préciser aussi, s'il y a lieu, les nouvelles pistes ou questions de recherche soulevées par les résultats.

Résultats clés :

Résultats directement attribuables aux travaux financés

Les travaux financés ont permis de **valider expérimentalement et numériquement** l'hybridation pneumatique comme solution pour améliorer l'efficacité énergétique des génératrices diesel utilisées dans les sites miniers isolés. Le concept hybride éolien-diesel avec stockage d'air comprimé a prouvé qu'il pouvait augmenter la pénétration des énergies renouvelables dans les systèmes hybrides de 30 % à 60 %.

Retombées observées ou confirmées

Les travaux ont déjà généré plusieurs **retombées scientifiques, technologiques et environnementales** :

- **Retombées scientifiques** : 1) Développement de **modèles numériques avancés** pour l'optimisation de moteurs diesel hybrides pneumatiques; 2) Production d'une trentaine de **publications dans des revues scientifiques**, renforçant la compréhension des systèmes hybrides éolien-diesel et de l'hybridation pneumatique.
- **Retombées technologiques** : 1) Validation d'un **prototype expérimental fonctionnel** démontrant la faisabilité de l'intégration du stockage d'air comprimé pour améliorer les performances des génératrices diesel. 2) Identification de **stratégies d'optimisation des moteurs diesel en conditions réelles**, ouvrant la voie à des applications industrielles.
- **Retombées environnementales** : 1) **Réduction directe des émissions de GES** grâce à la diminution de la consommation de carburant; 2) Intégration de **l'énergie renouvelable dans les opérations minières**, réduisant la dépendance aux combustibles fossiles.
- **Retombées économiques et industrielles** : 1) Potentiel d'**économies significatives** en carburant et en maintenance pour les entreprises minières; 2) Possibilité de **déploiement industriel à grande échelle**, avec des applications dans d'autres industries isolées dépendantes du diesel.

Nouvelles pistes et questions de recherche soulevées

Les résultats obtenus ouvrent plusieurs nouvelles perspectives de recherche :

- **Optimisation du contrôle de l'hybridation pneumatique** : Étudier les stratégies de gestion en temps réel du stockage et de l'injection d'air comprimé pour maximiser les performances du moteur.
- **Intégration avec d'autres sources d'énergie renouvelable** : Étendre le modèle aux systèmes incluant des panneaux solaires et des batteries pour une **hybridation multi-énergies**.
- **Analyse économique approfondie** : Évaluer la rentabilité de l'hybridation pneumatique sur le long terme en tenant compte des coûts de maintenance et de stockage de l'air comprimé.
- **Tests en conditions réelles sur des génératrices industrielles** : Développer des démonstrateurs dans des **mines nordiques isolées** pour tester la technologie à grande échelle.
- **Automatisation et Intelligence Artificielle** : Explorer **l'utilisation de l'IA pour optimiser la gestion énergétique** des systèmes hybrides éolien-diesel avec stockage d'air comprimé.

Conclusion

Ce projet a permis de démontrer **scientifiquement et expérimentalement** que l'hybridation pneumatique est une solution efficace pour **réduire la consommation de diesel, améliorer l'intégration des énergies renouvelables et limiter les émissions de GES** dans les sites miniers isolés. Les résultats ouvrent la voie à une **industrialisation de cette technologie**, avec des applications potentielles dans d'autres secteurs énergivores comme les transports et la production d'électricité en zones isolées.

Projets de recherche orientée en partenariat /
Développement durable du secteur minier - II – 2^e
concours

Rapport de vulgarisation scientifique

6. ÉTUDIANTS ET ÉTUDIANTES, POSTDOCTORANTS ET POSTDOCTORANTES IMPLIQUÉ(E)S DANS LE PROJET

A) Indiquez le nombre d'étudiant(e)s et de stagiaires postdoctoraux / postdoctorales impliqué(e)s dans la réalisation du projet de recherche par cycle d'études.

Collège / Université	1 ^{er} cycle	Maîtrise	Doctorat	Postdoctorat
UQAR		Ali Feki Raisa Barbosa Haithem Iben Abdallah Ahmed Ziyadi Ahmed Ajili Issam Ben Amar Sami Ayadi Ghazi Mhadhbi	Mohamad Issa Mohammadjavad Mobarra Ahmed Fayad Patrick Rizk	Abdellah Benallal Mohamed Yasser Hayyani
UQAC			Richard Lepage	
ETS		Abderrezak Kerroum		Fahed Martini