

“Interfaces électriques innovantes pour le refroidissement utilisant des céramiques ferroélectriques”

Thématiques (mots-clés)

Conversion d'énergie ; Matériaux et systèmes électroactifs ; Circuits électriques ; Gestion thermique

Laboratoires

- LGEF INSA Lyon (laboratoire de rattachement), Lyon, France (<https://lgef.insa-lyon.fr/fr>)
- LIST, Luxembourg, Luxembourg (<https://www.list.lu/fr/>), équipe Smart Materials (<https://researchportal.list.lu/organisation/detail/smat>)

Equipe d'encadrement

- Mickaël LALLART (LGEF INSA Lyon, directeur de thèse)
- Emmanuel DEFAY (LIST, co-directeur de thèse)
- Gaël SEBALD (LGEF INSA Lyon, co-encadrant de thèse)

Contexte

Les dispositifs réfrigérants sont d'une importance cruciale dans de nombreuses applications (transport alimentaire, confort, approvisionnement médical, etc.). Pourtant, les approches conventionnelles pour maintenir une température basse dans un système reposent toujours sur des gaz qui soulèvent des préoccupations environnementales et de sécurité. Les gaz actuels, à savoir les hydrofluorocarbures HFC, devraient être remplacés depuis 1997 (protocole de Kyoto). Pourtant, aucune alternative viable n'a encore été proposée à ce jour.

Dans le cadre du projet ANR PRCI « CooliSH », un changement de paradigme pour la réfrigération est proposé au travers de l'utilisation de matériaux électrocaloriques qui convertissent directement l'énergie électrique en flux de chaleur. L'objectif du projet est de proposer des approches innovantes et sans gaz pour les dispositifs de refroidissement. Le projet comprend 1) l'adaptation des matériaux et de la géométrie pour améliorer l'échange thermique entre le matériau actif et l'environnement, 2) un contrôle énergétiquement efficace du côté électrique et 3) le développement d'une preuve de concept complète afin de démontrer l'efficacité de l'appareil.

La présente proposition de doctorat porte principalement sur le second aspect, avec quelques contributions au troisième.

Objectifs

Ainsi, dans ce travail de doctorat, l'objectif principal sera d'implémenter le matériau et la structure électrocaloriques dans un système complet intégrant l'interface électrique de commande, en tenant compte de l'efficacité énergétique globale de l'ensemble. L'application d'un champ électrique sera combinée à la récupération des charges lors de l'exécution du cycle thermodynamique. Cela sera notamment rendu possible par la prise en compte de l'ensemble du système, avec la modélisation du système thermique global par un circuit électrique équivalent. En résumé, les deux principales missions du travail de doctorat sont :

1. Modélisation du comportement global du dispositif de refroidissement via des circuits électriques équivalents éventuellement non-linéaires.
2. Sur la base de l'approche globale réalisée à l'étape précédente, la conception et la mise en œuvre d'interfaces électriques efficaces comprenant la récupération de charges pour assurer des cycles régénératifs. Une telle implémentation sera à terme déployée dans un dispositif global pour preuve de concept.

Méthodologie et planning

Comme indiqué dans la section précédente, les travaux de doctorat seront décomposés en deux objectifs principaux : la modélisation du système global et le développement et la mise en œuvre de l'interface électrique.

Modélisation de la structure thermique globale

Pour permettre le développement d'une interface électrique efficace pilotant le matériau électrocalorique afin d'obtenir les meilleures performances de refroidissement, une représentation globale de la structure est nécessaire, prenant en compte les différents échanges thermiques impliqués dans le système. Bien que le couplage électrocalorique soit de nature multiphysique (reliant les domaines thermique et électrique), la conception de l'interface électrique, utilisant des composants électriques spécifiques avec leurs propres caractéristiques et étant potentiellement très non linéaire (par exemple par l'utilisation de transistors, diodes...), nécessite un cadre unifié orienté vers le domaine physique cible (c'est-à-dire l'électronique). Ainsi, la capacité de représenter le système thermique comme un circuit électrique équivalent est d'une importance majeure pour la conception d'une interface électrique bien adaptée.

Sur la base de l'analyse des différents transferts de chaleur mais aussi de l'effet de couplage à l'intérieur des matériaux électroactifs, un cadre global représentant le comportement thermique et son lien avec la réponse électrique du transducteur (et inversement du domaine électrique au domaine thermique) sera étudié et mis en œuvre. Une telle analyse prendra également en compte l'excitation de haut niveau et la réponse non linéaire associée (par exemple, saturation de polarisation) ainsi que la périodicité spatiale potentielle. Bien que la validation intermédiaire lors de la modélisation puisse être basée sur des simulations Matlab par exemple, la plateforme d'implémentation finale exploitera le moteur Spice (par exemple, LTSpice) pour le développement de l'interface électrique. Les étapes intermédiaires et finales de validation seront effectuées à partir de mesures réelles fournies par les partenaires du consortium du projet Coolish.

Développement et mise en œuvre de l'interface électrique

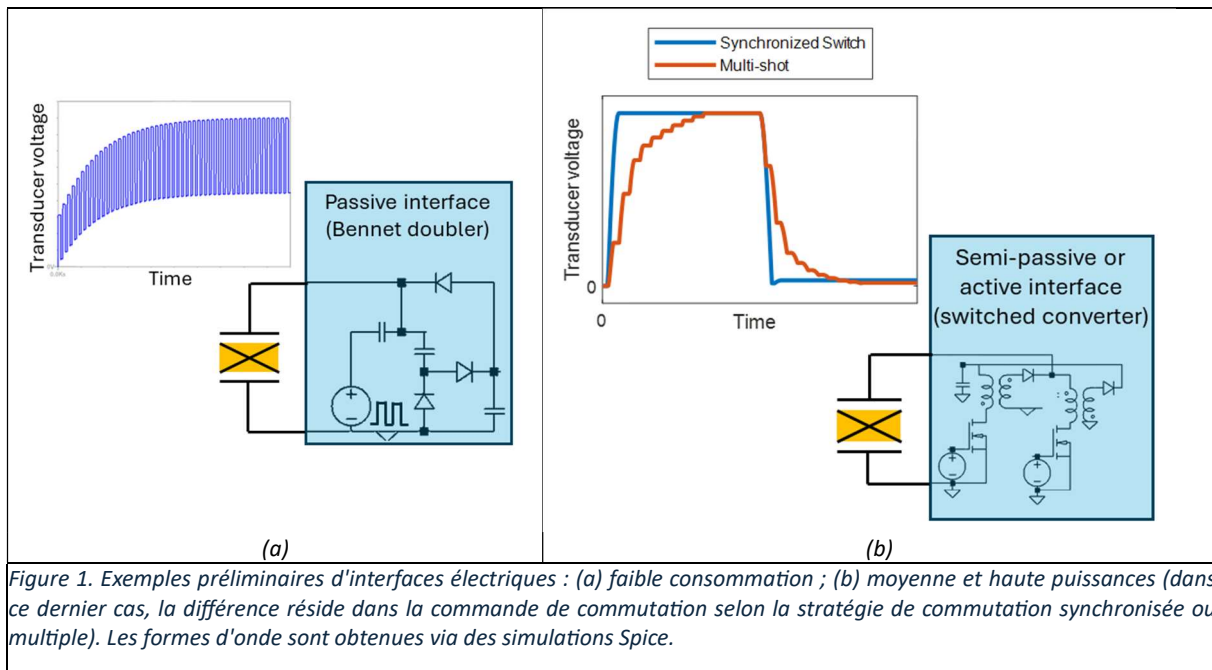
Une fois un modèle électrique équivalent et un premier modèle Spice prenant en compte les aspects thermiques et couplés disponibles, l'étape suivante consistera dans le développement de l'interface

électrique elle-même, qui sera optimisée d'un point de vue systémique. L'interface devra répondre aux deux points suivants :

1. Transfert efficace d'énergie électrique vers le transducteur électrocalorique et la structure
2. Capacité de cycle régénératif

Pour le premier point, le principe reposera sur la commutation intermittente de la source électrique sur le transducteur électroactif. Plusieurs stratégies seront développées selon le niveau de puissance ciblé. Ainsi, pour les applications à faible consommation, des interfaces passives utilisant des charges et décharges capacitatives, par exemple basées sur le doubleur Bennet, seront étudiées (Figure 1(a)). Pour les applications à haute puissance permettant des implémentations plus complexes, un contrôle partiel ou complet de commutation sera effectué, mettant en œuvre une charge à coup unique ou multiple via des composants inductifs pour augmenter l'efficacité du transfert d'énergie (Figure 1(b)). En plus de l'optimisation du transfert d'énergie, la décharge efficace sera également un développement clé de l'interface. En effet, pour fermer le cycle thermodynamique thermique (et électrothermique), il est obligatoire de revenir au point de départ initial, ce qui induit de retirer les charges sur le transducteur électrique. Cependant, cette suppression de charge doit être effectuée afin qu'elles puisse être récupérées par la source afin de limiter la perte d'énergie du système et assurer une grande efficacité (ou plus précisément un coefficient de performance élevé – *COP*). Pour ce faire, des boucles de rétroaction efficaces permettant des échanges d'énergie bidirectionnels seront mises en œuvre sur l'interface, là encore de manière quasi-passive (Figure 1(c)), ou via une ou plusieurs commutations actives (Figure 1(b)).

Parallèlement aux développements théoriques et aux simulations, la validation expérimentale constituera une part importante du travail. À cette fin, une carte de circuit imprimé (*PCB*) sera développée et testée à l'échelle du laboratoire (par exemple d'abord par charge et décharge de capacités pures), puis implémentée dans un dispositif global constituant une preuve de concept (*POC*) qui inclura les matériaux et structures spécifiques développés dans le cadre de l'ensemble du projet Coolish.



Planning

La planification provisoire associée est donnée dans Tableau 1.

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12
Analyse thématique et bibliographie												
Analyse physique de la structure et analogie avec les circuits électriques												
Développement de circuits équivalents												
Stratégie d'interface électrique												
Développement et essais d'interfaces électriques												
Implémentation dans la POC												
Rédaction et soutenance de thèse												

Tableau 1. Planification provisoire du travail de doctorat (Q=trimestre)

Profil du/de la candidat(e)

La personne candidate, titulaire d'un Master ou d'un diplôme équivalent (par exemple diplôme d'ingénieur français) ou proche de l'obtenir, doit avoir une solide formation en génie électrique et en gestion des systèmes énergétiques. Des compétences supplémentaires en conversion d'énergie et en physique seront considérées comme des atouts.

Le doctorat étant réalisé dans le cadre d'un projet collaboratif multi-partenaires, des compétences interprofessionnelles liées à la communication et au reporting sont également obligatoires.

Ce doctorat sera principalement effectué au LGEF (INSA Lyon), mais avec des séjours potentiels dans les locaux d'autres partenaires, notamment le LIST au Luxembourg.

Procédure

La procédure de sélection se décompose en 2 phases comme suit :

1. 1ère phase : éligibilité sur la base de la candidature (CV + lettre de motivation + relevés de notes ; Les lettres de recommandation sont optionnelles)
2. 2e phase : entretien avec l'équipe d'encadrement du doctorat

La planification provisoire est donnée dans le Tableau 2.

Fin des candidatures	27 février 2026
Résultats de la première phase	16 mars 2026
2 ^{ème} phase (entretiens)	16 mars 2026 – 17 avril 2026
Résultats finaux	30 avril 2026

Tableau 2. Calendrier provisoire des candidatures

Bibliographie

- Sebald G, Seveyrat L, Guyomar D, Lebrun L et al., 2006. J. Appl. Phys. 100, 124112. [doi:10.1063/1.2407271](https://doi.org/10.1063/1.2407271)
- Guyomar D, Sebald G, Pruvost S, Lallart M et al., 2009. J. Intell. Mat. Syst. Struct., 20(5): 609-624. doi: [10.1177/1045389X08096888](https://doi.org/10.1177/1045389X08096888)
- Defay E et al., 2018. Nat. Commun. 9, 1827. [doi:10.1038/s41467-018-04027-9](https://doi.org/10.1038/s41467-018-04027-9)
- Lallart M, Thetraphi K and Capsal J-F, 2018, Phys. Lett. A, 382(7): 449-454. doi: [10.1016/j.physleta.2017.12.030](https://doi.org/10.1016/j.physleta.2017.12.030)
- Torelló À, Defay E. 2021. Int. J. Refrig. 127, 174–179. [doi:10.1016/j.ijrefrig.2021.02.024](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.02.024)
- Nouchokgwe Y, et al. 2022. Scr. Mater. 219, 114873. [doi:10.1016/j.scriptamat.2022.114873](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2022.114873)
- Torelló A and Defay E. 2022. Adv. Electron. Mater. 8, 2101031. [doi:10.1002/aelm.202101031](https://doi.org/10.1002/aelm.202101031)

Ph.D. offer

“Innovative electrical interfaces for solid-state electrocaloric cooling using ferroelectric ceramics”

Thematic (keywords)

Energy conversion; Electroactive materials and systems; Electrical circuits; Thermal management

Laboratories

- LGEF INSA Lyon (lab of enrollment), Lyon, France (<https://lgef.insa-lyon.fr/fr>)
- LIST, Luxembourg, Luxembourg (<https://www.list.lu/fr/>), Smart Materials unit (<https://researchportal.list.lu/organisation/detail/smat>)

Supervising team

- Mickaël LALLART (LGEF INSA Lyon, supervisor)
- Emmanuel DEFAY (LIST, co-supervisor)
- Gaël SEBALD (LGEF INSA Lyon, co-advisor)

Context

Refrigerant devices are of critical importance in many applications (food transportation, comfort, medical supply etc.). Yet, conventional approaches for maintaining a low temperature within a system still rely on refrigerant gases that raise environmental and safety concerns. Current gases, namely hydrofluorocarbons HFC, have been expected to be replaced since 1997 (Kyoto protocol). Yet, no viable alternatives have been proposed so far.

In the framework of the ANR PRCI “CooliSH” project, a change of paradigm for refrigeration is proposed through the use of electrocaloric materials that directly convert electrical energy into heat flux. The objective of the project is to propose innovative, gas-free approaches for cooling device. The project encompasses 1) the material and geometry tailoring for enhancing thermal exchange between the active material and the environment, 2) the energy-efficient control on the electrical side and 3) the development of a full proof of concept in order to demonstrate the device efficiency.

The present Ph.D. proposal is mainly targeted on the second aspect, with some contributions to the third one.

Objective

Hence, within this Ph.D. work, the main objective will be to implement the developed electrocaloric material and structure within a global system incorporating the electrical driving interface, with in mind the global energy efficiency of the whole device. The application of an electric field will be combined with the recovery of charges while performing the thermodynamic cycle. This will be notably enabled by the consideration of the whole system, with the modeling of the global thermal system using equivalent electrical circuit. In summary, the two main tasks of the Ph.D. are:

1. Modeling of the global behavior of the cooling device through equivalent electrical circuit that are possibly nonlinear.
 2. Based on the global approach performed in the previous point, design and implementation of efficient electrical interfaces featuring charge recovery to ensure regenerative cycles. Such an implementation will be ultimately deployed in a general proof of concept device.
-

Methodology and planning

As explained by the previous section, the Ph.D. work will be decomposed into two main objectives: modeling of the global system and electric interface development and implementation.

Modeling of the global thermal structure

To allow the development of efficient electrical interface driving the electrocaloric material to achieve the best cooling performance, a global representation of the structure is required, taking into account the different thermal exchanges involved in the system. While the electrocaloric coupling is multiphysic by nature (linking thermal and electrical domains), the electrical interface design, using specific electrical components with their own characteristics and being possibly highly nonlinear (e.g., transistors, diodes...), requires a unified framework oriented towards the target physical domain (i.e., electronics). Hence, being able to represent the thermal system as an equivalent electrical circuit is of significant importance for the design of well-suited electrical interface.

Based on the analysis of the different heat transfer but also the coupling effect inside the electroactive materials, a global framework representing the thermal behavior and its link with the electrical response of the transducer (and conversely from the electrical to the thermal domain) will be investigated and implemented. Such an analysis will also consider high-level excitation and associated nonlinear response (e.g., polarization saturation) as well as potential spatial periodicity. While intermediate validation during modeling may be based on Matlab simulations, the ultimate implementation platform will take advantage of Spice engine (e.g., LTSpice software) for the development of the electrical interface. Obviously, intermediate and final validation steps will be done from actual measurements provided by the Coolish project consortium partners.

Development and implementation of the electrical interface

Once the equivalent electrical model of the global structure well advanced and a first Spice model taking account the thermal and coupled aspects of the device available, the next step will be the development of the electrical driving interface itself, that will be optimized from a systemic point of view. The interface will have to address the following two points:

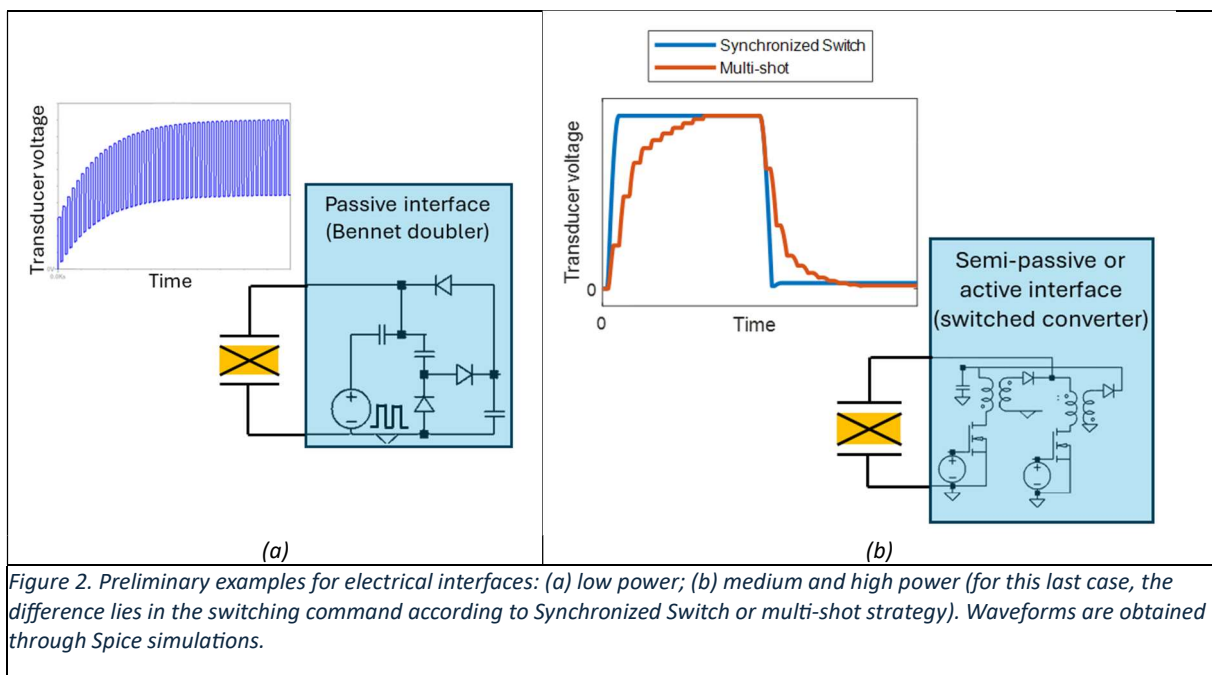
1. Efficient electrical energy transfer to the electrocaloric transducer and structure
2. Ability of regenerative cycle

For the first point, the principle will rely on switching the electrical power source intermittently on the electroactive transducer. Several strategies will be developed according to the targeted power level. Hence, for low-power applications, passive interfaces using capacitive charge and discharge, for

instance based on Bennet doubler, will be investigated (Figure 1(a)). For high-power applications which allow more complex implementations, partial or full switching control will be performed, implementing either single shot or multi-shot charging through inductive components for increasing energy transfer efficiency (Figure 1(b)).

Along with energy transfer optimization, efficient discharge will also be a key development of the interface. Indeed, in order to close the thermodynamic thermal (and electrothermal cycle), it is mandatory to go back to the original starting point, yielding the removal of charges on the electrical transducer. However, this charge removal should be performed so that they are recovered to the energy source in order to limit the energy loss of the system and ensure high efficiency (or more precisely high Coefficient Of Performance – *COP*). To do so, efficient feedback loops allowing bidirectional energy exchanges will be implemented on the interface, again in an almost passive way (Figure 1(c)), or through active single or multi-shot switch (Figure 1(b)).

Alongside theoretical developments and simulations, experimental validation will be a substantial part of the work. To this end, Printed Circuit Board (*PCB*) will be developed and tested at a lab scale (for instance first through pure capacitance charge and discharge) and then implemented in a global Proof Of Concept (*POC*) device which will include the specific materials and structures developed in the framework of the whole Coolish project.



Planning

Associated tentative planning is given in Tableau 1

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12
Subject analysis and bibliography												
Physical analysis of the structure and analogy with electrical circuits												
Equivalent circuit development												
Electrical interface strategy												
Electrical interface development and testing												
Implementation in POC												
Thesis writing and defense												

Table 3. Tentative planning for the Ph.D. (Q=quarter)

Candidate profile

The candidate, awarded a Master or equivalent degree (e.g., French engineer diploma) or close to be awarded such diploma, should have a strong background in electrical engineering and energy management system. Additional skills in energy conversion and physics will be considered as assets. The Ph.D. being performed in the framework of a multi-partner collaborative project, inter-professional skill related to communication and reporting are also mandatory.

This Ph.D. will be mainly performed in LGEF, INSA Lyon, but with potential stays in the premises of another partner, especially LIST in Luxembourg.

Procedure

The selection procedure is decomposed into 2 phases as follows:

3. 1st phase: eligibility on the basis of the application (resume + cover letter + transcripts; letter of recommendation are optional)
4. 2nd phase: interview with the Ph.D. supervising team

Draft planning is given in Tableau 2.

End of candidature	Feb. 27 th , 2026
1 st phase results	March 16 th , 2026
2 nd phases (interviews)	March 16 th , 2026 – April, 17 th , 2026
Final results	April, 30 th , 2026

Table 4. Tentative schedule for applications

Reference

- Sebald G, Seveyrat L, Guyomar D, Lebrun L et al., 2006. J. Appl. Phys. 100, 124112. [doi:10.1063/1.2407271](https://doi.org/10.1063/1.2407271)
- Guyomar D, Sebald G, Pruvost S, Lallart M et al., 2009. J. Intell. Mat. Syst. Struct., 20(5): 609-624. doi: [10.1177/1045389X08096888](https://doi.org/10.1177/1045389X08096888)
- Defay E et al., 2018. *Nat. Commun.* 9, 1827. [doi:10.1038/s41467-018-04027-9](https://doi.org/10.1038/s41467-018-04027-9)
- Lallart M, Thetpraphi K and Capsal J-F, 2018, Phys. Lett. A, 382(7): 449-454. doi: [10.1016/j.physleta.2017.12.030](https://doi.org/10.1016/j.physleta.2017.12.030)
- Torelló À, Defay E. 2021. *Int. J. Refrig.* 127, 174–179. [doi:10.1016/j.ijrefrig.2021.02.024](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.02.024)
- Nouchokgwe Y, et al. 2022. *Scr. Mater.* 219, 114873. [doi:10.1016/j.scriptamat.2022.114873](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2022.114873)
- Torelló A and Defay E. 2022. *Adv. Electron. Mater.* 8, 2101031. [doi:10.1002/aelm.202101031](https://doi.org/10.1002/aelm.202101031)