



Les questionnaires conceptuels : un outil pour changer les pratiques d'enseignement des circuits électriques ? Expérimentation croisée en France et en Colombie.

Michaël Canu^{1*}, Mauricio Duque², and Monica Patiño³

¹ Laboratoire de Didactique André Revuz, UR4434, Université Paris Cité, Paris / Université de Perpignan Via Domitia, 52 av. Paul Alduy 66860 Perpignan

² STEM Academia, ACCEFyN, Bogota, Colombie

³ Université El Bosque, Grupo ESyCV, Bogota, Colombie

*Auteur de correspondance : michael.canu@univ-perp.fr

Résumé : *Bien que dans le monde anglophone, par exemple aux États-Unis, les tests conceptuels, appelés « Concept Inventories » soient courants dans l'enseignement secondaire et supérieur, et même inclus dans les directives de l'American Board for Engineering and Technology (ABET), en France comme en Colombie, il n'existe pas d'initiatives précises pour développer ce type d'outil de mesure, ni dans l'enseignement secondaire ni dans l'enseignement supérieur. Or, ce type de test est particulièrement indiqué pour évaluer la connaissance conceptuelle spécifique dans beaucoup de disciplines et en particulier en sciences, comme les lois de l'électrocinétique, de la mécanique classique, etc. à l'université ou en formation d'ingénieur. Il y a eu très peu d'études en France reposant sur ce type de test et son pouvoir de prédiction de la performance des étudiants même si certains aspects ont cependant été examinés dans des travaux de thèse portant sur les étudiants de licences de physique en particulier. Ces outils permettent aussi d'évaluer les méthodes et pratiques courantes dans l'enseignement universitaire ou dans les facultés d'ingénierie et d'entrevoir des pistes pour changer les pratiques. Cet article, version traduite et augmentée de [1], propose une avancée dans cette direction, en montrant une utilisation axée sur l'enseignement de l'électronique, et plus précisément sur les concepts de base des circuits électriques. Basé sur la première version de l'Electric Circuits Concept Inventory d'Engelhard et Beichner modifié, l'outil proposé a permis de mesurer la compréhension conceptuelle d'étudiants en ingénierie électronique d'une université colombienne et d'étudiants en licence SPI en France et*

d'extraire des informations pertinentes sur de possibles améliorations des programmes d'étude actuel.

Mots clés : Conceptions, circuits électriques, raisonnement séquentiel, raisonnement local.

Abstract: Concept inventories: a tool to change teaching practices about electric circuits? Cross-experimentation in France and Colombia.

Although in the English-speaking world, for example in the United States, concept inventories are common in secondary and higher education and even included in the guidelines of the American Board for Engineering and Technology (ABET), in France as in Colombia, there are no specific initiatives to develop this type of measurement tool, neither in secondary education nor in higher education. However, this type of test is particularly suitable for assessing specific conceptual knowledge in many disciplines and in particular in science, such as the laws of electric circuits, classical mechanics, etc. at university or in engineering training. There have been very few studies in France based on this kind of test and its predictive power of student performance, although some aspects have been examined in thesis work on physics students 'understanding, in particular. These tools also make it possible to evaluate current methods and practices in university teaching or engineering faculties and to see ways to change practices. This article, translated and expanded version of [1], proposes a step in this direction, by showing a use focused on the teaching of electronics, and more specifically on the basic concepts of electrical circuits. Based on the first version of the modified Electric Circuits Concept Inventory by Engelhard and Beichner, the proposed tool made it possible to measure the conceptual understanding of electronic engineering students at a Colombian university and SPI students in France and to extract relevant information on possible improvements to the current curriculum.

Keywords: Misconceptions, electric circuits, sequential reasoning, local reasoning.

1. Introduction

Une caractéristique fondamentale de l'ingénieur expert dans un domaine spécifique est la capacité à utiliser des concepts disciplinaires pour résoudre des problèmes [2]. Cependant, les étudiants sont souvent incapables d'adapter leurs connaissances à d'autres problèmes et contextes qui diffèrent de ceux qui leur ont permis de construire ces connaissances. Depuis trois décennies, différents tests de niveau conceptuel ont été développés pour évaluer les étudiants en ingénierie et à travers eux, les méthodologies d'enseignement utilisées. Les Concept Inventories (CI) donnent un bon exemple de l'utilisation de modèles conceptuels pour évaluer la compréhension des étudiants en générant un ensemble de questions de manière systématique (à partir d'éléments cognitifs et d'observations du raisonnement utilisé).

Les CI consistent en des questionnaires à choix multiples dans lesquelles les distracteurs (propositions de réponses incorrectes) ont d'abord été développés pour des questions ouvertes et pour analyser les réponses données [3, 4]. Les questions sont basées sur la recherche en didactique disciplinaire et plus spécifiquement sur les recherches concernant les conceptions (souvent appelées erronées ou alternatives) des étudiants. En effet, les distracteurs - réponses incorrectes - sont généralement représentatifs des conceptions erronées des étudiants et ne sont pas choisis au hasard comme c'est souvent le cas dans les questionnaires à choix multiples classiques. C'est pourquoi les CI sont très axés sur un concept particulier et précis d'un domaine disciplinaire comme le concept de force, de lois du mouvement, de mécanique statique ou dynamique, d'électricité, etc. Plusieurs sites internet proposent ce type de test gratuitement pour les enseignants de l'enseignement secondaire et supérieur. L'un des plus connus est le site PhysPort de l'American Association of Physics Teachers (AAPT) où l'on peut trouver de nombreux Concept Inventories mis à jour régulièrement (<https://www.physport.org/assessments/>). Les articles scientifiques qui ont permis l'élaboration de ces tests sont généralement accessible dans les revues spécialisée et référencées dans chaque CI proposé sur ce site.

2. Contexte

2.1. L'ECCI

Plusieurs auteurs ont développé des CI (Concept Inventories) dans le domaine de l'électricité, comme [5], [6] qui ont conçu un test conceptuel sur les fondamentaux des circuits électriques appelé DIRECT (Determining and Interpreting Resistive Electric circuits Concepts Test). Ce CI a été utilisé, par exemple, par [7] pour évaluer une intervention didactique basée sur l'investigation avec des étudiants universitaires (évaluation formative et sommative).

Cette évaluation comprend des questions portant sur plusieurs concepts essentiels des circuits électriques en courant continu. Dans sa version originale 1.0, les concepts évalués sont :

Les aspects physiques des circuits en courant continu :

- Identifier et expliquer un court-circuit (un courant plus important circule dans le chemin de moindre résistance).
- Comprendre l'aspect bipolaire des éléments d'un circuit électrique (les éléments ont deux points de connexion possibles).
- Identifier un circuit électrique complet et comprendre la nécessité d'un circuit fermé pour que le courant circule en régime permanent.
- Appliquer le concept de résistance, y compris le fait que la résistance est une propriété de l'objet, qu'en série, plus on ajoute d'éléments, plus la résistance augmente, et qu'en parallèle, plus on ajoute d'éléments, plus la résistance diminue.
- Interpréter les schémas et diagrammes de divers types de circuits série, parallèle et leurs combinaisons.

L'énergie :

- Appliquer le concept de puissance (travail effectué par unité de temps).
- Appliquer le concept de conservation de l'énergie, y compris la loi des tensions de Kirchhoff ($\sum V = 0$ dans une maille) avec la batterie comme source d'énergie.

Le courant :

- Comprendre et appliquer la conservation du courant dans une variété de circuits.
- Expliquer l'aspect microscopique du flux de courant dans un circuit en utilisant des termes d'électrostatique.

La différence de potentiel (tension) :

- Appliquer la connaissance de l'intensité du courant qui est influencée par la différence de potentiel maintenue par la batterie et par la résistance.
- Appliquer le concept de différence de potentiel à une variété de circuits.

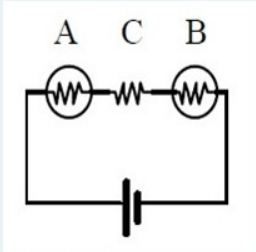
En plus de ces aspects conceptuels centraux, il est utile de cibler des obstacles didactiques liés à la construction même de l'idée d'électricité. Un de ces obstacles est le raisonnement séquentiel, modélisé par Closset en 1983 [8] et que l'on sait persistant chez les étudiants [9].

2.2. Le raisonnement séquentiel et local

Le raisonnement séquentiel en électrocinétique consiste à penser que le courant sort du pôle de la batterie, passe par les différents composants, se « consomme » dans certains de ces composants et finalement « revient » à la batterie. Les étudiants qui présentent ce type de conception erronée ne considèrent pas le circuit comme un système dans lequel chaque point dépend instantanément du reste du circuit.

Une des questions de l'ECCI original qui permet de tester ce raisonnement est présentée dans la figure 1.

Si on augmente la valeur de la résistance C, que se passe-t-il pour la luminosité des ampoules A et B ?



☐ a. A et B ne changent pas
☐ b. A et B diminuent
☐ c. A diminue, B ne change pas
☐ d. A et B augmentent
☐ e. A ne change pas, B diminue

Figure 1 : Question P12.

Cette même question se trouvait déjà dans une version légèrement différente chez Closset [8], considérant un état initial avec la résistance fixe et la même question en cas de variation de la résistance. L'objectif de ces questions est d'identifier si l'étudiant peut considérer le circuit comme un système et donc comprendre que les deux ampoules du circuit, étant identiques, vont briller de la même manière indépendamment de la valeur de la résistance (question 12) et de leur position sur le « chemin présumé » du courant. Dans la question posée par Closset, on

cherche également un élément temporel dans le raisonnement des étudiants : parfois ils raisonnent différemment s'ils pensent que le circuit est en régime permanent ou s'ils pensent qu'il y a des variations dans le circuit (ici, le circuit est toujours en régime permanent, donc il ne devrait pas y avoir de différence de raisonnement dans le cas d'une résistance fixe ou variable).

Une autre question, de type « boîtes noires », présentée en figure 3 a été ajoutée et permet de compléter le test sur le volet séquentiel. Il s'agit de vérifier d'une manière plus quantitative cette conception : on donne des indications chiffrées de courant avant et après la boîte noire et l'étudiant doit décider si cela est compatible avec les lois de l'électrocinétique selon le contenu supposé.

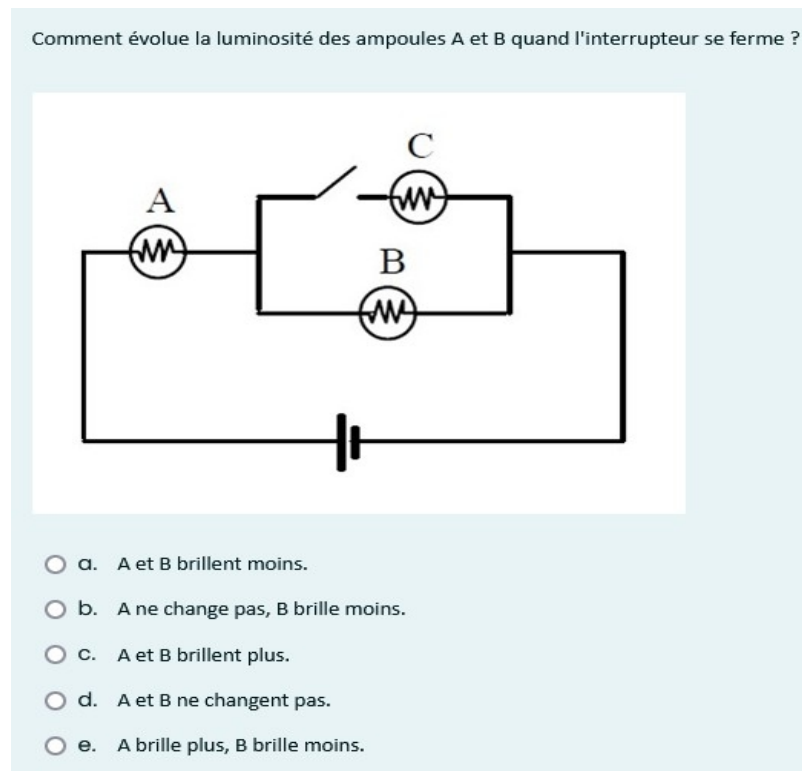


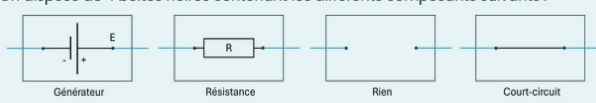
Figure 2 : Question P13.

Ce raisonnement se combine parfois avec un aspect local, dit raisonnement local, qui consiste à considérer les modifications du courant uniquement à l'endroit où se trouve le composant, le reste du circuit restant inchangé. Un exemple de test de ce raisonnement est présenté dans la question 13 (2). Dans ce circuit, l'étudiant doit identifier immédiatement que l'ampoule A ne peut pas rester identique si l'interrupteur est fermé car toute modification d'un composant du circuit a un effet sur le reste de la maille. Cependant, cela n'est pas suffisant pour répondre correctement à cette question et permet seulement d'écarter les réponses "a" et "e" dans un premier temps. Ensuite, l'étudiant doit savoir manipuler courant et tension en même temps pour répondre correctement.

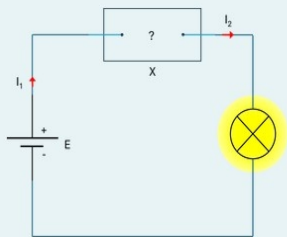
Il est d'ailleurs utile de noter que le comportement de la maille et en particulier de sa résistance, pose, lui, beaucoup moins de problèmes aux étudiants dans une configuration pourtant similaire. En atteste la question 2 (4) pour laquelle les taux de bonne réponse quant à la variation

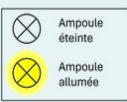
de la résistance de la branche proposée lorsque l'interrupteur se ferme oscille entre 72% et 84% suivant les groupes considérés.

On dispose de 4 boîtes noires contenant les différents composants suivants :



Considérons le circuit suivant dans lequel $E = 5 \text{ V}$, $I_1 = 1 \text{ A}$ et $I_2 = 0,8 \text{ A}$. A quelle(s) boîte(s) noire(s) peut correspondre X dans cette situation ?





- ☐ 1. Résistance
- ☐ 2. Rien
- ☐ 3. Court-circuit
- ☐ 4. Situation impossible
- ☐ 5. Générateur

Figure 3 : Question P7.

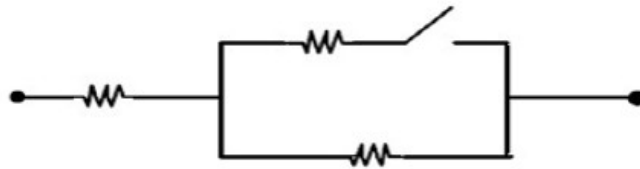


Figure 4 : Schéma de la question P2.

3. Méthodologie

Certaines questions de l'ECCI original d'Engelhardt et Beichner évaluent déjà le raisonnement séquentiel et local, comme la question 26 ou un aspect de la 29. Mais pour tester ce raisonnement avec plus de précision, nous avons ajouté d'autres questions du même type. Pour ne pas trop alourdir le questionnaire, nous avons mené une analyse de cohérence à l'aide du coefficient α de Cronbach [10] et, les questions de l'ECCI ayant le plus faible coefficient ont été exclues du test, passant de 29 à 22 items pour pouvoir ajouter les questions sur le raisonnement séquentiel. Nous avons testé l'évaluation conceptuelle ECCI modifié dans plusieurs universités. Un premier test a été appliqué à deux sections d'un cours de fondements d'électronique de la faculté d'ingénierie de Los Andes (Bogota, Colombie) au début et à la fin. Il a ensuite été proposé au début et à la fin de chaque semestre dans 3 cours successifs de circuits électriques de la formation d'ingénieur en électronique

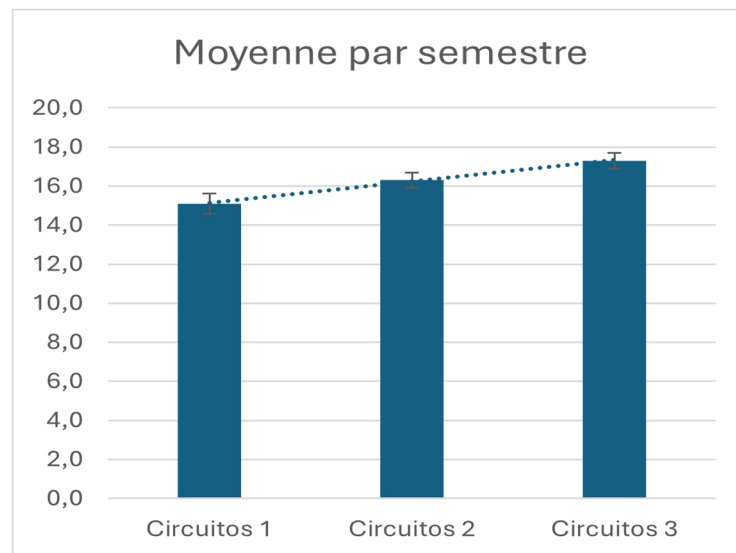
de l'université El Bosque à Bogota (Circuitos 1, 2 et 3). Tous les étudiants ($n = 63$) ont passé l'évaluation, ceux des cours de jour, comme ceux des cours du soir.

4. Résultats

Les résultats de ces différents groupes d'étudiants sont présentés dans les figures suivantes avec les barres d'erreur standard. Comme on peut l'observer dans le tableau 1 et la figure 5, le niveau des étudiants augmente en passant par les différents cours, ce qui suggère que ces cours permettent une construction conceptuelle qui se renforce du cours 1 au cours 3. La différence est significative, c'est-à-dire qu'elle ne provient pas d'une erreur aléatoire. Ceci est en accord avec les évaluations plus "classiques" proposées en contrôle continu et aux examens finaux pour les étudiants passant d'un semestre à l'autre (formation semestrialisée).

Cependant, la comparaison des 3 cours entre eux n'a qu'une validité relative, considérant que ce ne sont pas les mêmes étudiants qui sont évalués dans chaque cours. Nous avons cependant vérifié ces résultats en suivant une cohorte durant les 3 cours.

Figure 5 : Moyennes selon le cours-semestre.



	Moyenne	sd	Erreur
Circuitos 1	15.1	3.4	0.43
Circuitos 2	16.3	5.0	0.63
Circuitos 3	17.3	4.6	0.58

Table 1 : Comparaison des moyennes entre les cours-semestres.

5. Discussion

5.1. Sur les données de base

Le plus intéressant réside dans l'analyse des réponses à chaque question et surtout le décompte des réponses erronées de type "raisonnement séquentiel et local". Le tableau 2 montre ces résultats.

Réponses	P7	P12	P13
a	7	0	32
b	11	0	11
c	3	27	8
d	29	1	1
e	0	35	10
Réponse correcte	b	e	c
Difficulté	17%	56%	13%
Réponse + fréquente.			
	d : 46%	c : 43%	a : 52%

Table 2 : Analyse globale des réponses aux questions de raisonnement séquentiel et local (pourcentage de réponses).

On remarque que pour ces questions spécifiques, soit la réponse majoritaire (P7-d et P13-a), soit la réponse erronée majoritaire (P12-c), est celle représentant les conceptions de type linéaire causal et local.

De plus, on remarque que les conceptions erronées détectées par les 3 questions spécifiques de l'ECCI sont très stables dans le temps (tableau 3). On observe en effet des variations de seulement +0.1 point pour P7, -0.5 point pour P12 et -0.2 point pour P13 entre le semestre 1 et le 3. Ceci va dans le sens de la littérature sur le domaine des conceptions : une certaine stabilité dans le temps, indépendante de la progression académique. Alors que les résultats des évaluations globales augmentent d'un cours à l'autre, ce qui reflète l'acquisition d'une compréhension plus fine globale des concepts de l'électrocinétique, les raisonnements erronés de type séquentiel et local, eux ne changent pas. Il faut noter que les évaluations classiques, surtout basées sur l'application de calculs (loi d'Ohm, des mailles, des nœuds, etc.) ne sont pas en mesure de prendre en compte ces raisonnements, ce qui explique qu'elles se conservent jusqu'à l'université et persistent alors même que les étudiants passent d'une année à l'autre.

	P7	P12	P13
Initial C1	0.19	0.55	0.13
Evolution C1-C2	-0.11	0.12	0.04
Evolution C2-C3	0.12	-0.17	-0.06
Final C3	0.20	0.50	0.11

Table 3 : Évolution inter semestre (taux de bonne réponse).

5.2. Expérimentation en licence

14 étudiants volontaires français ont été sondés avec le même questionnaire en licence SPI L2, semestre 1. Ils présentent globalement les mêmes profils que les étudiants testés en Colombie bien que la moyenne soit plus faible dans ce groupe. Cependant, les étudiants étant volontaires, et en faible nombre, rien ne garantit qu'ils soient représentatifs de leur promotion. On observe, malgré tout, des taux de bonne réponse de 21% à la question P7 et P12 (tableau 4) et de 14% à la P13; des chiffres assez proches du cas des ingénieurs pour deux de ces trois questions. Au niveau du raisonnement séquentiel et local, en revanche, les résultats sont assez différents pour la P7 et la P13, avec des réponses erronées non directement liées au raisonnement séquentiel ou local. Pour la P12, on retrouve cependant le même comportement représentatif du raisonnement séquentiel, bien marqué, c'est la deuxième réponse la plus proposée (la première étant la réponse d : les ampoules ne changent pas).

	P7	P12	P13
Rep. corr.	21%	21%	14%
RSL	50%	29%	29%
Autre	29%	50%	57%

Table 4 : Résumé pour les L1 SPI.

6. Conclusion

Comme on l'a vu, l'application d'un outil de type Concept Inventory permet de détecter certaines failles dans le raisonnement des étudiants qui ne peuvent pas être détectées de manière

"classique", c'est-à-dire à travers des évaluations de connaissances déclaratives ou procédurales (résolution d'exercices calculatoires ou d'application le plus souvent). Il manquerait d'étudier l'évolution des mêmes étudiants à travers les 3 semestres du cours pour pouvoir extraire des résultats plus fiables, mais ces résultats partiels sont alignés avec des études similaires menées dans d'autres pays. Il paraît nécessaire de proposer des activités spécifiques pour que les étudiants puissent développer ces connaissances conceptuelles car l'étude classique de la matière à elle seule n'est pas suffisante pour combattre les conceptions alternatives. Des alternatives existent, et ont été testées en cours d'électronique dans la même université, comme la présentation de circuits avec une localisation non conventionnelle de la source (à droite, en haut ou en bas plutôt qu'à gauche) ou la résolution de problèmes spécifique soit sur des exemples fictifs, soit en pratique de laboratoire. Le retour de ces expérimentations cependant n'a pas encore été analysé.

Références

- [1] M. CANU et M. DUQUE. « Lecciones aprendidas de un curso de circuitos eléctricos en modalidad híbrida ». In : Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería : El cambio para la competitividad y la sostenibilidad. ACOFI. Cartagena de Indias, 2016, p. 85.
- [2] J. PELLEGRINO, L. DI BELLO et S. BROPHY. « The Science and Design of Assessment Engineering Education ». In : Cambridge Handbook of Engineering Education Research. 2013, p. 571598.
- [3] D. SANDS et al. « Using concept inventories to measure understanding ». In : Higher Education Pedagogies 3.1 (jan. 2018), p. 173-182.
- [4] M. W. KLYMKOWSKY et K. GARVIN-DOXAS.
Concept Inventories : Design, Application, Uses, Limitations, and Next Steps. Jan. 2020, p. 775790.
- [5] M. RAHMAN et T. OGUNFUNMI. « A concept inventory for an Electric Circuits course : Rationale and fundamental topics ». In : Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Paris, 2010.
- [6] P. ENGELHARDT et R. BEICHNER. « Students' understanding of direct current resistive electrical circuits ». In : American Journal of Physics 72.1 (2004), p. 98-115.
- [7] J. C. GETTY. « Assessing Inquiry Learning in a Circuits/Electronics Course ». In : 39th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference. San Antonio, Texas, 2009.
- [8] J.-L. CLOSSET. « Raisonnements en électricité et en hydrodynamique ». In : ASTER 14.4 (1992), p. 143-155.
- [9] L. VIENNOT. « Fundamental patterns in common reasoning : Examples in physics ». In : European Research in Science Education - Proceedings of the First Ph. D. Summerschool 12.2 (1994), p. 3347.
- [10] L. J. CRONBACH. « Coefficient alpha and the internal structure of tests ». In : Psychometrika 16.3 (sept. 1951), p. 297-334.

Biographie des auteurs

Michaël Canu : Docteur en Didactique de la Physique (Paris 7) et en Ingénierie (Los Andes), membre associé du laboratoire de didactique André Revuz (UR4434). Après avoir été professeur associé en automatique et électronique à la faculté d'ingénierie de l'université de Los Andes et El Bosque en Colombie, et responsable du groupe de recherche GIIE STEM+B, exerce comme conseiller pédagogique à l'université Perpignan Via Domitia.

Ismael Mauricio Duque Escobar : Docteur en Automatique et traitement du signal (INPG). Ancien professeur associé d'automatique et d'électronique à l'Université de Los Andes, Colombie et directeur du programme Pequeños Científicos, actuellement expert en éducation et directeur du programme STEM-Academia à l'Académie Colombienne des Sciences Exactes, Physiques et Naturelles (ACCEFyN).

Monica Maritza Patiño Martínez : Ingénieure en électronique, Magister en Enseignement Universitaire et professeure associée de la faculté d'ingénierie de l'université El Bosque, Colombie. Membre du groupe de recherche Electromagnétisme, Santé et Qualité de Vie.