

**L'Éducation au Développement Durable par
Problématisation de Phénomènes de Pollution
Environnementale en Formation
Initiale des Enseignants au Mali**

Sidi Mohamed Tounkara

LPSDIS, Département de physique et chimie,
Ecole Normale Supérieure, Bamako, Mali

Mohamed Soudani

Laboratoire S2HEP, Université Claude Bernard Lyon 1, Lyon, France

[Doi: 10.19044/esipreprint.8.2024.p478](https://doi.org/10.19044/esipreprint.8.2024.p478)

Approved: 20 August 2024

Posted: 22 August 2024

Copyright 2024 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Tounkara S.M. & Soudani M. (2024). *L'Éducation au Développement Durable par Problématisation de Phénomènes de Pollution Environnementale en Formation Initiale des Enseignants au Mali*. ESI Preprints. <https://doi.org/10.19044/esipreprint.8.2024.p478>

Résumé

La population malienne vit des problèmes environnementaux graves dont elle a pleinement conscience, mais les moyens pour y remédier font souvent défaut. L'éducation au développement durable (EDD) préconisée par l'UNSECO[1], et l'approche par compétences (APC) recommandée dans le curriculum malien impulsent un nouveau paradigme local dans ce domaine, mais peu opérationnalisé, notamment en éducation formelle. A l'échelle internationale, les approches de l'EDD sont souvent généralistes (changement climatique, pluies acides). Notre contribution présente une étude de l'EDD dans le cadre de l'enseignement de la chimie, puisque la chimie est au cœur des analyses des polluants de toutes sortes, de la compréhension de leurs modes d'actions et des méthodes de dépollution. Outre des aspects généraux de l'EDD, la manière d'exploiter la richesse du sous-sol du pays entraîne des problèmes plus spécifiques qui impliquent des procédés physico-chimiques (drainage minier, dragage d'orpillage des cours d'eau qui affectent la faune et la flore). L'enquête menée auprès de 360 (grade 8), 300 (grade 9), 150 (grade 10) et 120 élèves (grade 11), ont permis de mettre en évidence des difficultés d'élèves. Toutes fois, les pratiques

déclarées de cinq enseignants des Instituts de Formation des Maîtres (IFM) sont favorables à l'implémentation de l'EDD par problématisation du savoir. Sur la base de ces résultats, nous avons construit deux situations-problèmes. Nous discuterons des implications curriculaires de ces résultats, des leviers et obstacles pour une transposition didactique de la chimie de l'environnement pour intégrer l'EDD de manière efficiente en formation initiale et continue des enseignants dans le contexte malien, ainsi que des implications pour des recherches futures sur cette problématique.

Mots clés : Chimie, éducation au développement durable, enseignants, situations-problèmes

Integrating Education for Sustainable Development in Chemistry Classes : Levers and Obstacles in Secondary Teaching in Mali

Sidi Mohamed Tounkara

LPSDIS, Département de physique et chimie,
Ecole Normale Supérieure, Bamako, Mali

Mohamed Soudani

Laboratoire S2HEP, Université Claude Bernard Lyon 1, Lyon, France

Abstract

The Malian population is fully aware of the serious environmental problems it is facing, but often lacks the means to address them. Education for sustainable development (ESD), advocated by UNSECO, and the competency-based approach (CBA) recommended in the Malian curriculum, are promoting a new local paradigm in this field, but one that is little implemented, particularly in formal education. Internationally, approaches to ESD are often general (climate change, acid rain). Our contribution introduces a study of ESD in the context of chemistry teaching, since chemistry is at the heart of the analysis of pollutants of all kinds, the understanding of their modes of action and the methods of depollution. In addition to the general aspects of ESD, the way in which the country's rich subsoil is exploited gives rise to more specific problems involving physico-chemical processes (mining drainage, gold-panning dredging of watercourses affecting wildlife). The survey of 360 (grade 8), 300 (grade 9), 150 (grade 10) and 120 students (grade 11), highlighted the difficulties faced by students. Yet, the declared practices of five teachers from the "Instituts de Formation des Maîtres (IFM)" were open to the implementation of ESD

through the problematization of knowledge. On the basis of these results, we have constructed two problem situations. We will discuss the curricular implications of these results, the levers and obstacles for a didactic transposition of environmental chemistry to integrate ESD efficiently in initial and in-service teacher training in the Malian context, and the implications for future research on this issue.

Keywords: Chemistry, education for sustainable development, teachers, problem situations

Introduction

La présente étude fait partie du projet du département de physique et chimie de l'école normale supérieure de Bamako d'élaborer des ressources pour l'enseignement secondaire et la formation des enseignants sur l'intégration de l'éducation au développement durable (EDD) dans les cours de ces sciences. En effet, le Mali est touché de plein fouet par d'innombrables problèmes environnementaux qui ne sont malheureusement pas survenus du jour au lendemain, mais dont les conséquences vont en s'aggravant, rendant leur prise en compte par toutes les sphères de la société indispensable (MEADD, 2017 ; Holthuijzen & Maximillian, 2011). Les sociétés savantes proposent de s'associer à l'école et au lycée pour promouvoir une telle éducation intégrée aux disciplines. Les apprentissages scolaires nécessitent d'être contextualisés par des exemples concrets tirés de la vie quotidienne des apprenants. Les problèmes environnementaux au Mali concernent toutes les populations, rurales et citadines, et peut de ce fait servir d'un excellent terrain dans lequel ces apprentissages prennent racines et se développer. En effet, sans EDD, les populations peuvent continuer à porter préjudice à leur environnement à travers certaines de leurs pratiques coutumières courantes.

Dans cette optique, il nous semble pertinent de faire une étude de la prédisposition du terrain à l'implantation d'un tel projet, sur l'ensemble du curriculum. Ainsi, nous proposons ici de présenter les problèmes environnementaux en question et d'étudier les pratiques déclarées des enseignants maliens sur leurs éventuelles intégrations dans le cadre de l'enseignement de la chimie. Cette étude préalable nous permettra d'envisager des propositions concrètes en direction de la formation initiale et continue des enseignants pour leur prise en compte plus efficiente en enseignement.

L'éducation relative à l'environnement (ERE), prônée à la conférence intergouvernementale de Tbilissi en 1977 (UNESCO, 1977) a évolué pour donner naissance à l'EDD, concept qui englobe le premier et lui adjoint la dimension de durabilité. L'EDD peut être définie comme étant la

préparation des jeunes à devenir des citoyens responsables à l'avenir en leur permettant de développer des compétences (connaissances et attitudes et savoir-faire) qui leur permettent de réfléchir et d'agir de manière responsable envers leur environnement, envers eux-mêmes et envers les générations futures afin de parvenir à la durabilité (Burmeister & al., 2012). L'UNSECO (2013) la rattache explicitement à l'enseignement : l'EDD signifie inclure les questions clés du développement durable dans l'enseignement et l'apprentissage (...) Cela nécessite également des méthodes d'enseignement et d'apprentissage participatives qui motivent et donnent aux apprenants les moyens de changer leur comportement et d'agir en faveur du développement durable. L'éducation au développement durable promeut par conséquent des compétences telles que la pensée critique, l'imagination de scénarios futurs et la prise de décisions de manière collaborative¹.

Son intégration dans tous les programmes d'apprentissage d'ici 2025 a été recommandée depuis par l'UNESCO, et rappelée en 2021. C'est ainsi que, la gestion des déchets, la réduction des émissions de polluants, la protection de la faune et de la flore, ainsi que la couche d'ozone ou encore les enjeux éthiques des biotechnologies (etc.) sont abordés dans une perspective de responsabilisation et de développement durable dans des programmes de plusieurs pays (Cappellaro, 2023 ; Martínez-Borreguero, 2020). Parce que nous devons tous, dans nos contextes locaux respectifs, œuvrer dans le sens défini par l'ONU, notre travail s'inscrit dans cette préoccupation mondiale sur les causes et les conséquences de la pollution des eaux naturelles. Il s'agit de focaliser les efforts éducatifs sur la formation des jeunes : leur faire prendre conscience des situations environnementales actuelles et leurs conséquences sur le déséquilibre écologique, sur la santé publique, sur les inégalités économiques qui sont à l'origine de l'injustice sociale. L'éducation a un rôle fondamental à jouer dans la construction chez les jeunes de compétences scientifiques et professionnelles qui leur permettent de contribuer au présent pour dépasser « le vivre au jour le jour » et construire, sur des bases scientifiques, un futur meilleur qui est le leur. En vue de généraliser cette formation à l'environnement et au développement durable, l'UNESCO (2021) a analysé les politiques d'intégration de l'EDD de 46 États membres dont les programmes scolaires intègrent l'EDD. Le « changement climatique » et la « biodiversité » sont respectivement mentionnés dans 47% et 19% seulement dans leurs manuels scolaires. Ce constat est alarmant de nos jours, puisqu'il témoigne d'un manque considérable à gagner dans l'EDD.

A l'échelle mondiale, de nombreux chercheurs ont contribué à l'atteinte d'objectifs en éducation environnementale, à travers des travaux

¹ Notre traduction de l'anglais

sur les conceptions, l'innovation curriculaire, la réalisation de projets, les pratiques enseignantes et la formation des enseignants en EDD (Chiu & al., 2022 ; MacDonald & al., 2022 ; Hanson & Hanson, 2022 ; Nguyen & al., 2020 ; Lasker, 2019 ; Orgill, York & MacKellar, 2019 ; Tsakeni, 2018 ; Sauvé, 2017 ; Orange & Orange Ravachol, 2017 ; Karpudewan, 2016 ; Garner & al., 2015 ; Burmeister & al., 2012). Tous les niveaux scolaires et universitaires sont concernés par l'EDD. Nous revenons plus sur l'analyse de quelques approches et leurs résultats.

Sur le plan environnemental, Le Mali est victime de sa richesse géologique et sa spécificité géographique (MEADD, 2017). Les problèmes environnementaux auxquels il fait face ne sont pas seulement globaux et communs comme dans d'autres pays, comme le réchauffement climatique, ils sont aussi spécifiques, comme le drainage minier acide, les engrais, les élevages, etc. Ils impactent la vie quotidienne de la population, en termes de ressources et de santé publique. De plus, la capitale se caractérise par l'insuffisance des réseaux d'assainissement des eaux usées par endroits, rendant la gestion des déchets liquides et solides plus complexe, et dont la majorité est déversée dans le fleuve Niger qui parcourt le territoire national sur 1700 km (Traoré & al., 2022). Si ces problèmes constituent une priorité de réflexion et d'action pour les pouvoirs publics, ils sont aussi visibles, perceptibles pour la population, indistinctement des statuts et des lieux de vie sur le territoire national. Du point de vue didactique qui est le nôtre, les aborder à l' cole a ainsi beaucoup de sens pour les apprenants, ce qui constitue un levier contextuel favorable à l'EE et l'EDD. Nous pensons que ces  ducatons doivent faire partie intégrante du curriculum, et être une des priorités du système éducatif malien. L' cole étant capable de contribuer à l'amélioration du présent de la société, et de porter une bonne part de ses projets, si on en lui en donne les moyens.

Sur le plan de la recherche, une large couverture de ces problèmes environnementaux est faite par des travaux de spécialistes en sciences humaines : socio-anthropologues, géographes, historiens (Maiga & al., 2022 ; Traoré & al., 2022 ; Sissoko, 2019). Ces travaux s'appuient sur des résultats d'analyses chimiques de source extérieure. Cela atteste de l'importance de la chimie de l'environnement pour l'EDD, qui convainc à la fois les scientifiques et le grand public, et laisse présager d'une entrée en EDD privilégiée dans cette discipline. En effet, comme l' cole est l'un des véhicules privilégiés pour toute «  ducation à », nous pensons que l'approche disciplinaire de l'EDD par la chimie apporte une contribution notable. Cependant, cette approche est peu explorée. En effet, comme il semble l'être dans les recherches sus-indiquées, cet aspect disciplinaire ne s'oppose pas au concept de la pensée systémique. Bien au contraire, il est propice à sa promotion, et donc au décloisonnement disciplinaire. Les élèves gagneront à

comprendre très tôt que la nature est multifacette, et que sa compréhension et sa préservation est l'affaire de tous les acteurs et citoyens et de toutes les approches disciplinaires, interdisciplinaires (Sund & Gericke, 2020), et même adisciplinaires qui œuvrent en synergie.

Notre contribution vise donc, dans le cadre de l'intégration de l'EDD dans les cours de chimie au niveau du secondaire, à élaborer une transposition didactique de la chimie de l'environnement pour mettre en évidence la possibilité de le faire. Compte tenu de l'importance de cette problématique dans le contexte malien, la finalité est d'initier une réflexion sur son intégration curriculaire officielle dans le contexte malien. Ces objectifs nécessitent que nous présentions les spécificités géologique, géographique et climatiques particulières du Mali qui conditionnent un mode de vie lui aussi spécifique qui a un impact environnemental spécifique.

La suite du texte est articulée autour d'une problématique présentant l'implication de la chimie dans la compréhension des phénomènes environnementaux, notamment ceux spécifiques au contexte malien, l'état de la question d'EDD dans le curriculum malien, quelques exemples de travaux traitant de cette question en EE et EDD en chimie. Nous présenterons ensuite l'analyse des résultats de l'enquête auprès des enseignants sur les possibilités de contextualiser l'enseignement de la chimie par des problèmes environnementaux spécifiques au pays. Ceci dans l'optique d'initier une proposition de ressources sous forme de situations-problèmes concrétisant des possibles contextualisations curriculaires au Mali.

Problématique et cadre théorique

Pollution des eaux et objectifs de développement durable

La chimie de l'environnement traite des réactions, de la destinée, des mouvements et des sources des produits chimiques dans l'air, le sol et l'eau (Baird & Cann, 2016). Dans les douze principes de la chimie verte, qui est partie intégrante de la chimie de l'environnement, des problèmes de pollution et la manière de les prévenir sont largement traités (Burmeister & al., 2012). La pollution des eaux naturelles est un problème environnemental majeur. Les principaux problèmes de pollution des eaux auxquels le Mali est confronté se situent (1) en zones minières tel que le drainage minier acide et le dragage d'orpillage des cours d'eau, et (2) en zones rizicoles et cotonnières tel que l'utilisation d'engrais synthétiques en fortes quantités. Les conséquences désastreuses sont nombreuses (Thimmappa, 2023 ; OMS, 2022 ; Traoré & al., 2022 ; Assaad, 2019) : pollution des eaux de surface entraînant l'asphyxie de poissons par dizaines de milliers suite aux changements de pH et la migration des oiseaux qui évitent de s'abreuver dans ces eaux ; acidification des sols ; présence de métaux lourds et de nitrates dans les nappes phréatiques ; eutrophisation des cours d'eau,

réduisant la navigabilité, la mobilité des poissons et la disponibilité de l'oxygène dissous. Les activités artisanales et industrielles génèrent à leur tour des eaux usées qui se déversent dans les cours d'eau. En tant que partie intégrante de son environnement, la population est impactée sur tous les plans, notamment par la contamination par l'intermédiaire de la chaîne alimentaire. Ces problèmes relèvent de phénomènes physico-chimiques et biologiques dont la compréhension pourrait être déléguée à l'école comme mission éducative et préventive, d'intérêt public. C'est pour cela que leur intégration à l'enseignement de la physique-chimie (mais aussi aux sciences de la vie, de la terre et de l'univers) est un des moyens de mettre en œuvre les objectifs d'apprentissage du développement durable (ODD) de l'UNESCO (2017). Ces objectifs sont d'ordre cognitif (l'élève comprend les causes, les effets et les conséquences de la pollution), d'ordre socio-émotionnel (l'élève est capable de communiquer au sujet de la pollution de l'eau) et d'ordre comportemental (l'élève est capable d'influencer les décisions concernant la pollution). La chimie est plus particulièrement propice à cette intégration, de par son rôle spécifique dans la production, la gestion et le traitement, l'analyse et la reconnaissance de polluants de l'air, de la terre et des eaux (Garner & al., 2015 ; Jegstad & Sinnes, 2015).

L'EDD a par ailleurs pour rôle de faire prendre conscience à la jeunesse malienne de leur place dans leur environnement actuel et de se projeter dans le futur qui est le leur : si certains d'entre eux ne semblent pas affectés directement par certains problèmes actuels, c'est qu'ils compensent par d'autres phénomènes et d'autres moyens, ceci participe des inégalités sociales qui doivent être intégrées dans cette lutte. En revanche, d'autres êtres vivants, comme les oiseaux ou les poissons, par exemple, finissent par périr. Faisant partie de son environnement, l'être humain en est le seul acteur pensant, et se doit d'en prendre soin en apprenant à en comprendre les phénomènes en jeu et leurs enjeux, en élaborant des solutions et des gestes responsables. A défaut, il sera, lui aussi, impacté dans la boucle systémique.

Ces problèmes, connus même sommairement par les apprenants, constituent autant de cas concrets, réel, qui ont du sens pour eux, qui les touchent individuellement et collectivement. Cela en facilite la dévolution. Ils se prêtent ainsi à bien des approches disciplinaires qui intègrent l'EE et l'EDD, comme préoccupation sociétale et enjeu de leur avenir, beaucoup mieux que des approches conceptuelles frontales où les expériences sont épurées, hors sol, visant uniquement des concepts et des lois dont les apprenants ne perçoivent pas l'utilité dans leur vie de tous les jours. De telles approches permettent non seulement de donner du sens aux apprentissages, mais aussi du sens au travail scientifique, à sa nature. En effet, il nous semble qu'une des bases de la pertinence des apprentissages scolaires réside dans la promotion des contenus scolaires par une contextualisation ancrée

dans les problématiques du pays, avec des activités authentiques de résolution de problèmes. Cela donne tout son sens à l'APC qui est recommandée officiellement dans le curriculum malien, mais peu comprise et quasiment pas pratiquée par les enseignants (Toukara, Diawara & Soudani, 2020). Il s'agit là de l'une des conditions sine qua non qui donne du sens aux apprentissages, et qui permet la formation de citoyens responsables, suffisamment imprégnés des problématiques qui impactent leur société actuelle, et capables de relever les défis qui les attendent.

C'est dans ce sens que notre travail œuvre pour participer aux efforts d'amélioration de la qualité de la formation et du taux de réussite des élèves au baccalauréat qui ne dépasse pas actuellement les 30%. En effet, « si l'apprentissage est associé à une action de la part de celui qui apprend, il est également associé à une situation ou, si l'on veut, au contexte dans lequel cette connaissance est ancrée. Vouloir dissocier l'apprentissage de son contexte, c'est rendre l'apprentissage stérile, non significatif, donc voué à l'oubli ». (Dalceggio, 1991, p. 5, cité par Bah, 2016). D'où la place centrale que ces questions doivent occuper dans le curriculum, du primaire à la formation des enseignants. Nous nous posons alors la question dans quelle mesure le curriculum malien permet-il cette intégration ? Comment des enseignants du secondaire font-ils cette intégration ? Quels types de ressources proposer aux enseignants de chimie du secondaire sur l'EDD ?

Programmes de chimie en IFM et au lycée face à l'exigence d'une EE et EDD

Dans les IFM, les professeurs du secondaire assurent la formation des élèves-maîtres spécialistes et des généralistes ; le recrutement se fait soit à partir du Bac, soit à partir du diplôme de l'enseignement fondamental. Les généralistes enseignent au premier cycle de l'enseignement fondamental (primaire), et les spécialistes au second cycle de l'enseignement fondamental (collège). Ceux qui reprennent les études pour une formation en Licence sont redéployés comme professeur du fondamental. Les programmes de formation sont adossés aux programmes scolaires correspondants. Le principe est que les enseignants y sont formés avec des approches didactiques et pédagogiques analogues à celles qu'ils sont susceptibles de mettre en œuvre dans leur future classe. Cependant peu de travaux se sont intéressés au caractère effectif et efficient d'un tel principe. Toukara & al. (2020) ont exploré cette question quant à l'appropriation par des enseignants du secondaire de la situation-problème en chimie dans le cadre de la réforme curriculaire au Mali. Mais la question de l'EE et EDD reste clairement inexplorée dans ce contexte. Si notre intérêt dans ce texte porte là-dessus, il nous faut d'abord comprendre le contexte du programme officiel dans lequel les enseignants exercent. Nous présentons donc sommairement le contenu de

ladite formation, notamment de l'analyse immédiate : décantation, filtration, traitement de l'eau, les engrais et les acides et bases.

En 1^{re} année IFM, les techniques de séparation concernent la séparation solide-solide (trilage magnétique, enrobage, etc.), solide-liquide (décantation, filtration, distillation simple, etc.), solide-gaz (séparation électrostatique) et liquide-liquide (distillation fractionnée). Cette première séquence aboutit aux corps composés (niveau macroscopique). L'analyse de l'eau (électrolyse) conduit à la formation des corps simples, les gaz oxygène et hydrogène (macroscopique). Ces deux corps seront distingués par la suite par les atomes de leur molécule (niveau microscopique). Au lycée (grade 10), sont abordées, dans les dernières séquences, les solutions acido-basiques (acide chlorhydrique, hydroxyde de sodium, notion de pH), et la caractérisation des ions métalliques. Au niveau des IFM (1^{re} année), sont abordés, en plus, l'acide carbonique et l'acide phosphorique. Bien que les engrais soient au programme de terminales Sciences, comme en 2^e année IFM, ils ne peuvent être reliés aux techniques séparatives qui ne sont pas au programme de lycée d'enseignement général, à l'exception de la séparation chromatographique.

Certes, les enseignants des IFM et des lycées d'enseignement général sont encouragés à évoquer, généralement sous forme de séminaires, des questions environnementales en lien avec les séquences d'enseignement. Toutefois, lier l'APC, avec la charge de difficultés que sa mise en œuvre représente (Cwinya'ay & al., 2023 ; Tounkara, Doawara & Soudani, 2020 ; Arbia & al., 2018), à l'EDD relève d'une formation didactique spécifique dont ils ne bénéficient pas jusqu'à présent, ni en formation initiale, ni continue. Il n'y a pratiquement aucune ressource en la matière qui pourrait les encourager dans une autoformation et une prise d'initiative dans leurs pratiques. Pourtant, une telle formation permettrait d'implémenter en classe un tel lien sous forme de résolution de problèmes réels qui donne du sens aux apprentissages et prépare concrètement les esprits à faire corps face à ces problèmes. Notre hypothèse se trouve par ailleurs justifiée a priori par le fait que l'EDD n'est pas explicitement prescrite dans les programmes des IFM et des lycées d'enseignement général. Ce fait amène à s'interroger sur la politique éducative et le projet de société qu'elle est censée véhiculer, puisqu'elle impacte la validité même des contenus et des stratégies d'enseignement et d'apprentissage, et par là même la pertinence des apprentissages réalisés.

Travaux sur la pollution des eaux en rapport avec l'EDD

La pollution environnementale impacte négativement les cycles bio-géo-chimiques. En EE, des auteurs se sont appuyés sur la pollution des eaux par des décharges d'ordures, des eaux usées et des carcasses d'animaux en

rapport avec des maladies comme le paludisme (Boutet *et al.*, 2016). Ces auteurs ont impliqué 22 élèves (11-12 ans) du primaire, 19 élèves (16-17 ans) de terminale et 32 jeunes adultes de 3^e année plomberie, dans un projet de sensibilisation des populations pour la préservation de l'environnement en Guinée Conakry. Contrairement à ces travaux sur des aspects visibles de la pollution, d'autres projets d'éducation environnementale ont plutôt porté sur le phénomène de visualisation d'image. C'est le cas des travaux de Dziob *et al.* (2020), qui ont utilisé des images satellitaires de télédétection en plus des excursions sur le terrain. L'étude a concerné 39 enseignants de lycée de diverses disciplines dont la chimie et 184 lycéens (K-9 et K-10). Les résultats ont montré que tous les enseignants sont d'avis que ce projet, permettant de travailler sur des données réelles sur l'impact de la pollution, peut être implémenté à l'école. L'importance des images et des films vidéo s'explique par le fait que les processus de pollution sont très lents dans certains milieux (Fokides *et Arvaniti*, 2020). Les films vidéo peuvent aussi servir d'introduction à une action plus concrète, comme dans les travaux de Nakhlik *et al.* (2023) sur des représentations et pratiques de 28 enseignants aux USA. Dans une classe de lycée de l'un des enseignants, des élèves ont visionné un film sur l'élimination des plastiques au niveau des océans et leur recyclage. Cette approche a consisté à traiter la pollution actée, contrairement au 1^{er} principe de la chimie verte qui stipule que : « il est préférable d'éviter de produire les déchets plutôt que de les traiter ou de les détruire après leur formation ». L'enseignant a de ce fait amené les élèves à préparer du plastique biodégradable. Ce qui cadre avec le 10^e principe de la chimie verte sur la biodégradabilité (non-persistance des polluants générés) et met en valeur les connaissances et savoir-faire chimiques. D'autres approches consistent en une comparaison, comme celle d'une solution aqueuse à l'eau de mer (Asikin *et Yulita*, 2019) en termes d'importance et d'analyse chimique de la pollution. Mais si les méthodes d'analyse sont presque identiques, les propriétés des eaux naturelles diffèrent de celles des solutions aqueuses et en constituent donc les limites de cette analogie. Le recours aux travaux pratiques dans le cadre de l'EDD permet également de travailler sur des échantillons réels. Des élèves (âges : 15-16 ans) ont ainsi analysé des ions nitrate sur des échantillons prélevés dans des plans d'eau, qui sont objets à la prolifération des plantes (Gawankar & Masten, 2023). Ils ont ensuite été sensibilisés au problème d'eutrophisation des cours d'eau et à ses conséquences dans le cadre de l'EDD.

Mais il est aussi possible et même souhaitable de s'appuyer sur la résolution de problème à l'école en faisant le lien avec des problèmes rencontrés dans des situations réelles (Ma *et Shengli*, 2020). La construction de textes générateurs de situations-problèmes liées à la pollution environnementale, favoriserait à la fois la conceptualisation de la chimie et la

compréhension des phénomènes de pollution. Bien que l'écriture d'un livre sur l'apprentissage basé sur des problèmes en matière de pollution de l'eau, par 40 participants dont 25 enseignants, ait pris trois ans (Warliyah & al., 2023) ; elle permet d'expliquer l'invisible (pollution des eaux souterraines) par le visible (déchets liquides et solides). Les contenus enseignés en chimie présentent donc des opportunités pour intégrer les questions environnementales spécifiques au Mali (qui sont partagées avec d'autres pays, notamment dans le voisinage direct) comme contextes concrets qui leur donne du sens et peut déboucher sur une EDD. Ces contenus sont censés être enseignés (en formation initiale comme en lycée) avec une APC articulée autour de résolution de problèmes. Toutefois, cette approche reste très peu appropriée par les enseignants qui ont encore besoin d'accompagnement et de ressources commentées issues d'expérimentations en classe (Toukara et Soudani, 2022). Cet état de fait ne présage rien d'encourageant quant à l'intégration spontanée par les enseignants des questions environnementales dans l'enseignement de la chimie dans un curriculum qui ne les prend pas en charge. Pourtant l'APC gagnerait à être contextualisée par ces problématiques environnementales susceptibles de développer de nombreuses compétences achevées.

Problème et problématisation dans l'enseignement des sciences

Dans les enseignements scientifiques, le problème tient une place qui ne se limite plus aux seules évaluations, mais concerne directement les enseignements et les apprentissages : enseignement par problèmes scientifiques, par situations-problèmes ou par démarche d'investigation (Orange, 2005). Une variété qui peut se décliner selon plusieurs dimensions dont : - celles des références épistémologiques ; - celle des types de problèmes soumis aux élèves ; - celle des descriptions du processus de travail du problème et de la problématisation (ibid.). Nous nous inscrivons dans la rupture épistémologique (Fabre, 2005) en privilégiant la résolution de situations-problèmes dans l'investigation scientifique. La situation-problème (Meirieu, 1988 ; cité par Fabre, 1997), s'oppose aux pédagogies de la réponse et aux pédagogies du problème : « *Tout l'effort de la pédagogie des situations-problèmes est d'organiser précisément l'interaction pour que, dans la résolution du problème, l'apprentissage s'effectue. Cela suppose que l'on s'assure, à la fois, de l'existence d'un problème à résoudre et de l'impossibilité de résoudre le problème sans apprendre* ».

Outils méthodologiques pour le recueil de nos données

Nous avons eu recours à l'enquête par entretien, dirigé par l'enseignant-chercheur (EC), afin d'accéder aux pratiques déclarées des enseignants. Les participants sont au nombre de cinq enseignants (E1-5) de

physique-chimie, formateurs en IFM, tous volontaires. Toutes les questions sont ouvertes et elles sont en rapport avec des problèmes de pollution de l'environnement pouvant être intégrés aux cours de chimie. L'avantage des questions ouvertes réside dans l'instantanéité des réponses (Soudani, 2014). Mais le coût du traitement reste élevé, d'où le nombre réduit d'enquêtés. Les questions et les réponses en rapport avec l'EDD sont notées respectivement QEDD et REDD. Celles en rapport avec l'APC, sont à leur tour, notées respectivement QAPC et RAPC. L'analyse des données s'appuie sur le traitement qualitatif de ces données.

Nous présentons et discutons dans ce qui suit les résultats de cette enquête. Nous présenterons par la suite l'ébauche de deux séquences d'enseignement-apprentissage de la chimie que nous avons élaborées sur cette base, pour intégrer la pollution des eaux dans le cadre de l'APC. L'idée étant de fournir aux enseignants des ressources à partir desquelles ils peuvent mettre en place des situations-problèmes, avec en perspective de recherche l'idée d'expérimenter ces séquences en classe.

Résultats et discussion

Les résultats sont d'abord présentés, avant d'être discutés.

Résultats

Les résultats obtenus lors de l'enquête sont récapitulés dans les tableaux 1 et 2 ci-dessous.

Tableau 1 : Résultats en rapport avec des difficultés d'élèves du fondamental et de lycée

| Difficultés d'élèves | Résultats et pourcentage | Nombre | Grade |
|--|--|--------|-------|
| Phases d'un mélange hétérogène et homogène | La séparation par décantation (eau + particules) et la distillation (séparation eau et sels) enregistrent plus de réussite (95%) que l'identification des constituants de l'eau naturelle. | 360 | 8 |
| Macroscopique : réaction chimique | Combustion du carbone : mise en évidence du gaz carbonique par la chaux (99%) | | |
| Dissolution | Différence entre gaz chlorhydrique et acide chlorhydrique (5%) | | |
| Macroscopique (corps simples et composés) et microscopique (atomes et molécules) | Distinction entre formule brute molaire (éléments) et formule développée (atomes) des composés organiques (10%) | 300 | 9 |
| Eaux naturelles et solutions aqueuses | La mise en évidence des ions H_3O^+ et OH^- (pH-mètre ou indicateurs colorés) en solution aqueuse et l'interprétation sont plus faciles (100%) que pour le caractère acido-basique des eaux ($CO_2 + H_2O$) (pH normal : 6,5-8,5). | 150 | 10 |
| Macroscopique (corps simples et composés) et microscopique (atomes et molécules) | Distinction entre formule brute molaire (éléments) et formule développée (atomes) des composés organiques (10%) | 300 | 9 |
| | Registre microscopique pour le mécanisme d'oxydation des alcools et aldéhydes (20%) | 120 | 11 |

Tableau 2 : Pratiques déclarées d'enseignants des IFM sur l'expérimentation

| Difficultés rencontrées par des enseignants | Oui | Non |
|---|------------|------------|
| Décantation et filtration des eaux naturelles | | ✓ |
| Distillation de l'eau naturelle pour former de l'eau pure | | ✓ |
| Mise en évidence des gaz, oxygène et hydrogène, obtenus par électrolyse | | ✓ |
| Géométrie de molécules (H_2O ; O_2 ; H_2) par modèles moléculaires | | ✓ |
| Mise en évidence du gaz carbonique (formé par : $HCl + CaCO_3$) par la chaux | | ✓ |
| Acidité (ou basicité) d'une solution aqueuse d'acide (ou de base) | | ✓ |
| Explication des méfaits de l'orpillage par le mercure | | ✓ |
| Mise en évidence et interprétation de l'acido-basicité des eaux naturelles | ✓ | |
| Pollution des eaux souterraines ou de surface par des engrais | ✓ | |
| La pollution des eaux de puits en zones contonnières ou minières | ✓ | |
| L'inefficacité des matériaux filtrants après saturation | ✓ | |

Les difficultés des élèves (grade 8) commencent à partir de la troisième ligne du tableau 1, où ils n'ont pas compris que la préparation de l'acide chlorhydrique à partir du gaz chlorhydrique est une réaction chimique. Pourtant, la réaction chimique a été étudiée avec la combustion du carbone dans l'air. Le gaz carbonique formé est mis en évidence par le lait de chaux. Les eaux naturelles ne sont pas au programme de lycée d'enseignement général, mais les acides et bases y sont étudiés et bien avant (grades : 8 et 9). Or, les résultats (grade 10) montrent que la particularité de l'eau n'a pas été soulignée.

En 1^{re} année IFM, dans la première séquence, la réaction chimique apparaît avec l'électrolyse de l'eau (3^e ligne, tableau 2), avant celle-ci il s'agit plutôt de phénomènes physiques. La troisième ligne apparaît donc comme une interprétation de la réaction chimique d'électrolyse de l'eau. Les équations de réaction d'oxydoréduction aux électrodes et l'équation-bilan sont écrites. L'étude de la pollution des eaux souterraines et de surface reste théorique (2^e année), de même que les performances des matériaux de filtration (1^{re} année).

Discussion

Difficultés d'élèves et pratiques déclarées des enseignants

Les pratiques déclarées des enseignants mettent en évidence la possibilité d'une contextualisation de la chimie à partir des problèmes environnementaux liés à l'orpillage traditionnel, qui est visible dans toutes les zones aurifères de plusieurs régions du pays. La vapeur de mercure, évoquée par des enseignants, est très toxique et les chimistes de l'eau et de l'environnement évoquent encore le désastre de Minamata au Japon en 1950, où un empoisonnement de la population a eu lieu du fait du méthylmercure (Bair et Cann, 2016). Cependant, des problèmes environnementaux en amont

de l'analyse immédiate, comme le drainage minier peuvent être abordées, car dans les mines inondées, de la pyrite (FeS) acidifie le milieu. Lorsque ces eaux acides atteignent les cours d'eau, les ions Fe(III) précipitent sous forme d'hydroxyde (Fe(OH)_3) à la surface, éliminant toute forme de vie par asphyxie. De même le dynamitage des roches lors de l'exploitation minière, avant traitement, pollue les nappes phréatiques en nitrates. Le même type de pollution est engendré par l'utilisation des engrais en excès. Les ions nitrate, NO_3^- , forment des ions nitrite, NO_2^- , dans l'organisme. Ceux-ci sont responsables de la méthémoglobinémie chez des nourrissons, en oxydant les ions fer(II) de l'hémoglobine en ions fer(III) (Bair et Cann, 2016). De plus, la pollution des eaux par des métaux lourds, peut être intégrée au traitement (élémentaire) des minerais par enrobage et triage magnétique qui sont étudiés dans les IFM. En effet, la toxicité des métaux lourds sur la flore, la faune et l'organisme par la chaîne alimentaire est avérée (Thimmappa, 2023). Ainsi, il apparaît clairement que la problématique de l'environnement nécessite d'être une question curriculaire des premiers cours en chimie des métaux au fondamental (fer, aluminium, cuivre et zinc) jusqu'à la formation des enseignants. Sans cette approche systémique prise en charge par le système éducatif, les problèmes environnementaux restent en marge de l'école, et donc en dehors de l'état d'esprit du futur citoyen, alors qu'ils impactent les intérêts matériels et la santé de chaque citoyen du pays.

Les tableaux 1 et 2 montrent que, bien qu'ayant étudié des dizaines de leçons sur les transformations et réactions chimiques avant d'être admis dans les IFM, les élèves-maîtres et élèves-professeurs commencent par des phénomènes physiques de l'analyse immédiate avant les réactions chimiques et leur interprétation au niveau microscopique. Ce schéma est conforme au programme d'entrée du fondamental, où ils sont appelés à enseigner. Cependant, les résultats du tableau 1 (3^e, 4^e et 6^e lignes) montrent que des élèves du fondamental (grades 7, 8 et 9) utilisent indifféremment le registre macroscopique aussi bien pour les atomes, molécules et ions que pour les substances chimiques. Cette confusion, est la principale difficulté à laquelle des élèves sont confrontés dans la compréhension de la chimie (Taber, 2013). Cette confusion, n'ayant pas été prise en charge, persiste jusqu'au lycée (grades 10 et 11) (tableau 1).

La principale difficulté d'enseignants est liée à la contextualisation de la chimie par le prélèvement d'échantillons réels et l'expérimentation, du fait du manque de matériels et de produits (tableau 2). La méthode elle-même nécessite une formation continue des enseignants. Zahir et al. (2019) sont parvenus aux mêmes résultats dans leur enquête auprès de 40 professeurs et 383 étudiants d'universités de trois facultés différentes (biologie, géologie et géographie). Les enquêtés ont évoqué le manque de ressources matérielles et humaines. Toutes fois, cette contextualisation de la

chimie par des problèmes environnementaux reste possible, notamment celui de la pollution des eaux naturelles (tableaux 2). Les travaux pratiques réalisés par Gawankar & Masten (2023) ont confirmé cette possibilité par l'analyse des ions nitrate sur des échantillons réels prélevés dans des plans d'eau dans le cadre de l'EDD. Le cours d'eau était objet à l'eutrophisation. Un développement anarchique des plantes, qui absorbent l'oxygène, réduit la navigabilité et entrave la mobilité des poissons. Le résultat ultime est la minéralisation du plan d'eau avec disparition des micro-organismes. La diffusion de l'excès d'ions nitrate des engrais synthétiques à travers le sol est un autre phénomène. Celui-ci est à rapprocher de la saturation du matériau filtrant (charbon actif, media filtrant). Cette saturation explique le passage sélectif des ions à travers les matériaux. De la même manière, les eaux des nappes phréatiques ne sont pas filtrées à travers un sol saturé. Les difficultés d'expérimentation sont donc à prévoir, du fait que le rapport à l'expérimental (Cariou, 2015) est essentiel dans la démarche scientifique recommandée dans les prescriptions officielles sur l'APC. La validation expérimentale d'hypothèses a été utilisée dans les travaux de recherche de Tounkara et Soudani (2022) sur les titrages acido-basiques en contexte malien. Dans la séance mise en œuvre par un enseignant débutant en classe de terminale Sciences exactes, l'expérience a été utilisée dans la validation d'hypothèses des élèves. Elle a favorisé le développement de compétences dans la résolution des situations-problèmes, la manifestation et le franchissement de l'obstacle lié au concept de neutralisation et l'évolution de pratique de l'enseignant débutant. Cette étude de cas peut être mise à profit pour appréhender les caractères acido-basiques des eaux naturelles et des eaux de pluie.

Perspectives de recherche : textes générateurs de situations-problèmes

Le principe qui guide notre réflexion est celui d'un enseignement de la chimie fondé sur l'investigation. Pour cela, le fonctionnement de la classe doit abandonner la posture d'autorité des savoirs scientifiques et d'expertise de l'enseignant pour placer les apprenants en situation de résolution de problèmes dont les données et les retombées les concernent au premier degré. C'est dans ce type de conditions que l'engagement des apprenants dans leur apprentissage peut être garanti, et leur apprentissage peut avoir du sens. Cela facilite à la fois les apprentissages et l'enseignement, et introduit, presque naturellement, en tout cas de manière tout à fait sensée des espaces de débat et d'argumentations. Dans notre contexte, les problèmes environnementaux spécifiques au Mali sont tout à fait pertinents comme contextualisations des apprentissages de la chimie, pour les initier à la démarche scientifique selon l'APC.

Chacune des propositions de SP est raccordée à une référence du programme officiel, avec les contenus concernés. Ces contenus sont habituellement abordés sans problématisation du savoir ni application de la démarche scientifique, ni au niveau des IFM ni au niveau des lycées (Tounkara, Diawara & Soudani, 2020). Nous les avons contextualisés par des problèmes environnementaux connus des élèves. Ainsi, dans les deux situations présentées ci-dessous, les élèves sont sollicités dès la phase d'échantillonnage. Les polluants et leurs sources sont nombreux et divers, l'enseignant n'a que l'embarras du choix. L'objectif n'est pas de les recenser, il s'agit plutôt de procéder à une transposition didactique de certains problèmes environnementaux qui ont du sens pour les élèves pour en faciliter la dévolution. Ils deviennent alors un contexte pertinent pour apprendre les contenus de chimie comme outils de résolution de problèmes.

Pour la SP1 (Tableau 3), la réaction chimique du carbonate de calcium avec les acides, dont l'acide carbonique, est au programme des IFM. De plus, la séquence sur l'acide chlorhydrique et l'hydroxyde sont en fin de programme, aussi bien dans les IFM que dans les lycées d'enseignement général. La période de leur traitement coïncide avec les premières pluies. La dissolution du gaz carbonique dans l'eau de pluie pourrait être abordée directement (IFM) ou par analogie avec celle du gaz chlorhydrique dans l'eau (IFM et lycée) : la première conduisant à une pluie acide qui est de l'eau, la seconde, différente de l'eau, est une solution aqueuse. Les pluies acides (pH faible) dissolvent des hydroxydes métalliques qui précipitent à nouveau au niveau des branchies (pH élevé) des poissons provoquant leur asphyxie.

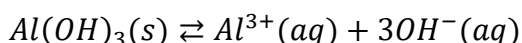


Tableau 3 : SP1 : première ressource pour générer des situations-problèmes : cas du problème environnemental gaz carbonique-pluies acides

| |
|--|
| <p>La SP1 concerne la classe de 2^e année IFM sur la réaction des acides avec le carbonate de calcium, notamment celle de l'acide carbonique et par analogie pour le lycée (grade 10) d'enseignement général, elle s'accorde à la séance sur l'acide chlorhydrique (préparation, propriétés des ions chlorure et hydronium, notion de pH). Les concepts de transformation et de réaction chimique constituent des prérequis. En plus des objectifs disciplinaires, ceux de l'EDD sont en rapport avec l'application de la démarche scientifique dans la résolution de problème, la compréhension de la formation des pluies acides à partir de la formation de l'acide carbonique ; la compréhension de la pollution systémique et son impact négatif sur l'environnement ; et les solutions possibles, avec leurs avantages et inconvénients. Les élèves seront introduits à la question de la composition de l'eau de pluie, et, après réflexion-débat, sur le comment et le pourquoi de telle ou telle composition. Ils seront alors amenés à récupérer de l'eau de pluie, conservée dans un flacon rempli et fermé hermétiquement.</p> |
| <p>Situation-problème : voici un flacon contenant de l'eau de pluie.</p> |
| <p>Question 1 : selon vous, quel est le caractère acido-basique de l'eau de pluie ? Comment peut-on le savoir ? Selon les prérequis, l'étayage devra les amener à une mise en évidence de l'acidité à l'aide d'un papier pH ou d'un appareil pH-mètre portable ou encore d'un</p> |

| |
|---|
| indicateur coloré. |
| Question 2 : Comment expliquez-vous alors ce phénomène ? |
| Question 3 : Comment y remédier ? |
| Question 4 : Quel effet le changement de pH a-t-il sur les hydroxydes peu solubles ? |

La SP2 (Tableau 4) porte sur la pollution des eaux souterraines par des composés azotés. Ce choix s'explique par les problèmes évoqués, son origine anthropique contrairement aux ions métalliques pouvant provenir des oxydes métalliques contenus dans des roches. Lorsque la charge polluante est très élevée, le matériau filtrant n'est plus efficace en raison de sa saturation et doit être régénéré (dans la pratique). Cette différence de concentration entre les couches superficielles du sol et les nappes phréatiques, entraîne la diffusion des ions. L'eau souterraine (filtrée par le sol) était considérée comme de l'eau potable, ce qui n'est plus le cas de nos jours en raison de cette pollution. Les élèves pourront comprendre l'importance de traiter la pollution à la source, afin de préserver l'environnement dont ils font partie.

Tableau 2 : SP2 : deuxième ressource pour générer des situations-problèmes : cas du problème environnemental engrais-pollution eaux naturelles

| |
|---|
| La SP2 concerne la classe de 3 ^e IFM généralistes. Elle s'accorde à la séance sur les « eaux naturelles et potabilisation de l'eau » : décantation, filtration, traitement organoleptique, chloration ou ozonation. En plus des objectifs portant sur l'application de la démarche scientifique dans la résolution de problème et les limites de la filtration simple dans la potabilisation de l'eau ; ceux de l'EDD sont en rapport avec la conceptualisation de la pollution systémique liée à l'excès d'engrais et son impact négatif sur l'environnement. |
| Pour l'expérience de caractérisation : (1) prévoir : eau de puits et kit de caractérisation des ions nitrate. Pour l'expérience de mise évidence : (2) prévoir un mélange de sable + gravier ; solution saturée de nitrate de sodium et dispositif de filtration : le filtrat obtenu contiendrait des ions nitrates par saturation du matériau. |
| Situation-problème : Il a été observé une prolifération anarchique de plantes aquatiques dans la partie d'un cours d'eau bordée par des champs agricoles, menaçant la vie aquatique. Ce phénomène est dû aux ions nitrate (NO_3^-) provenant des engrais utilisés en excès. |
| Question 1 : Est-il possible que des eaux souterraines soient polluées à leur tour par du nitrate ? Si oui, comment le savoir ? Si non, dites pourquoi ? |
| Question 2 : Comment expliquez-vous le passage des ions nitrate de la surface du sol aux eaux souterraines ? |
| Question 3 : Comment y remédier ? |

En perspective, ces deux SP vont faire l'objet d'une expérimentation avec des enseignants de physique-chimie volontaires pour en apprécier l'efficacité sur deux plans :

- comparer les acquis sur l'environnement entre cette approche d'intégration et l'approche par simple sensibilisation. Dans quelle mesure ces SP permettent-elles de développer chez les élèves des compétences de démarches de résolution de problèmes

environnementaux ? La compétence étant entendue comme ensemble indissociable de connaissances et de savoirs-faire mobilisables dans la résolution d'un problème non routinier. Dans quelle mesure suscitent-elles chez eux un intérêt et un plus grand engagement pour poursuivre des efforts (réflexions, investigations et actions concrètes) en faveur de l'environnement et du développement durable ?

- comparer les acquis de la chimie entre cette approche et l'approche d'intégration par « transmission ». Dans quelle mesure cette contextualisation donne-t-elle davantage de sens aux connaissances en chimie et permet-elle de mieux les structurer, de mieux se les approprier en tant qu'outils de résolution de problème.

Au Mali, les enseignants et futurs enseignants qui n'ont pas bénéficié de formation en chimie de l'environnement et en APC doivent donc bénéficier d'une formation continue qui leur permet de s'approprier la problématique, avec les connaissances scientifiques toujours actualisées, les approches didactiques les plus efficaces pour assurer la transmission auprès de la jeunesse, citoyens d'aujourd'hui et futurs citoyens et acteurs de leur société.

Ce projet devra alors mobiliser les structures de formation continue, mais aussi les IFM qui jouent un rôle fondamental dans cette problématique. En effet, le pays n'a pas seulement besoin de chercheurs et d'ingénieurs spécialistes de l'environnement, mais aussi de toutes les sphères de la société qui doivent être impliquées dans une responsabilisation individuelle et collective pour lutter contre ces problèmes. L'école est le moyen le plus efficace pour porter les projets de société et les promouvoir dans les connaissances, les consciences et les actions. C'est pour cela que pour notre part, nous proposons ici deux exemples de situations-problèmes qui peuvent servir de ressources pour les enseignants, tout en mettant en évidence la fécondité de cette contextualisation au niveau officiel. Mais pour le chercheur, elles nécessitent encore une démarche d'expérimentation afin d'en apprécier la manière dont les enseignants les adoptent et les adaptent, en éprouver les effets sur les apprentissages, et de mieux les adapter en conséquence en collaboration avec les praticiens.

Conclusion

Le contexte malien est aussi marqué par des problèmes environnementaux spécifiques tels ceux engendrés par l'exploitation minière, les eaux usées résiduelles et industrielles et l'utilisation d'engrais. La préservation de l'environnement a toujours été une préoccupation nationale. Des politiques de sensibilisation ont toujours été prônées par les autorités. Nous pensons que mieux ces problèmes sont compris par les citoyens, plus

ils seront sensibles et l'EE et l'EDD en constituent un moyen efficace pour le présent et le futur ; les enseignants enquêtés ayant manifesté leur intérêt à cette approche. C'est face à cette problématique et sur la base des pratiques déclarées des enseignants d'IFM, que nous avons proposé deux situations-problèmes de manière à ce qu'elles puissent être intégrées aux cours de chimie sans nécessité de modifier les volumes horaires. Elles seront proposées à des enseignants volontaires pour implémentation en situation de classe afin d'étudier leur adhésion à la contextualisation de la chimie par des problèmes environnementaux et la manière dont ils s'en approprient. Une première approche de cette faisabilité sera étudiée avec des enseignants de l'IFM, qui sont nos collègues, sous forme d'une formation continue en la matière, ainsi qu'avec les futurs enseignants comme formation initiale, pour mieux les adapter a priori aux enseignants de lycée. C'est ainsi que plusieurs auteurs se sont appuyés sur la chimie verte dans le cadre de l'EDD. Mais pour que la chimie verte soit un levier d'intégration de l'EDD au niveau scolaire, Burmeister & al. (2012) suggéraient comme préalable, la formation des enseignants en chimie verte.

Cette étude présente certaines limites. Par exemple, l'outil d'investigation, aussi bien dans sa forme que dans son contenu, aurait gagné à être complété par un questionnaire papier/crayon, et l'échantillonnage des participants qui n'a pu couvrir une population d'enseignants représentatifs. Certes, le fait que la majorité exerce dans la capitale du pays est propice à des constats marquants des problèmes environnementaux. Mais d'autres régions se caractérisent aussi par d'autres problèmes auxquels la population est encore plus touchée. Les informations ainsi recueillies pourraient être enrichies par l'avis des élèves sur les mêmes questions pour apprécier le rapport entre ce que les enseignants pensent faire et dire en classe et ce que les élèves en perçoivent.

Contribution des auteurs : Tous les auteurs ont contribué, Soudani est le Professeur.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Arbia, A., Kaddari, F., Hour, R. H., & Elachqar, A (2018). Les Obstacles Qui Entravent L'application De L'approche Par Compétences Par Les Enseignants Du Secondaire Qualifiant. *European Scientific Journal*, 14(4), 249-256.
2. Asikin, N., & Yulita, I. (2019). Scientific literacy-based chemical teaching materials design of chemical solution materials on sea pollution context. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 5(2), 204.
3. Assaad, A. (2019). *Pollution anthropique de cours d'eau : caractérisation spatio-temporelle et estimation des flux*. Éditions universitaires européennes (thèse de doctorat de Université de Lorraine).
4. Bah, M. B. (2016). Enjeux socio-politiques dans la mise en œuvre de l'apprentissage par problèmes (APP). *Éducation relative à l'environnement*, 13, 2, consulté le 24/12/2023, DOI : <http://doi.org/10.4000/ere.782>
5. Baird, C., & Cann, M. (2016). *Chimie de l'environnement*. Bruxelles : De Boeck.
6. Boutet, M, Gadbois, A, Samson, G, Bah, MB. et Diallo, KN. (2016). Analyse d'une démarche de résolution de problèmes environnementaux en République de Guinée. *Éducation relative à l'environnement*, 13(2), 113-128. DOI : <https://doi.org/10.4000/ere.665>
7. Burmeister, M., Rauch, F., & Eilks, I. (2012). Education for Sustainable Development (ESD) and chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 13(2), 59-68.
8. Cappellaro, E. (2023). Compréhension de la Complexité à l'Aide des Approches Systémique et Interdisciplinaire pour l'Éducation à l'Eau. *Journal of Uludag University Faculty of Education*, 36(1), 122-149. Doi : <https://doi.org/10.19171/uefad.1152817>
9. Cariou, J-Y. (2015). Le statut épistémologique de l'expérience dans les nouvelles approches préconisées pour l'enseignement des sciences. *RDST*, 59-85 doi.org/10.4000/rdst.1132
10. Chiu, W. K., Fong, B. Y., & Ho, W. Y. (2022). The importance of environmental sustainability for healthy ageing and the incorporation of systems thinking in education for a sustainable environment. *Asia Pacific Journal of Health Management*, 17(1), 84-89.
11. Cwinya'ay, W. P., Niyonkurun C., & Bapolisi, B. P. (2023). Stratégies didactiques de l'éducation environnementale en RD Congo : Les pratiques enseignantes au degré terminal de l'Enseignement primaire dans la ville de Bunia (Province de l'Ituri).

- International Journal of Innovation and Applied Studies*, 39(2), 917-926.
12. Dziob, D., Krupiński, M., Woźniak, E., & Gabryszewski, R. (2020). Interdisciplinary teaching using satellite images as a way to introduce remote sensing in secondary school. *Remote Sensing*, 12(18), 2868.
 13. Fabre, M. (2005). Deux sources de l'épistémologie des problèmes : Dewey et Bachelard. *Les Sciences de l'éducation-Pour l'Ère nouvelle*, 38(3), 53-67.
 14. Fabre, M., & Orange, C. (1997). Construction des problèmes et franchissements d'obstacles. *Aster: Recherches en didactique des sciences expérimentales*, 24(1), 37-57.
 15. Fokides, E., & Arvaniti, P. A. (2020). Evaluating the effectiveness of 360 videos when teaching primary school subjects related to environmental education. *Journal of Pedagogical Research*, 4(3), 203-222
 16. Garner, N., Siol, A., & Eilks, I. (2015). The potential of non-formal laboratory environments for innovating the chemistry curriculum and promoting secondary school level students education for sustainability. *Sustainability*, 7(2), 1798-1818.
 17. Gawankar, S., & Masten, S. J. (2023). Development of an Inexpensive, Rapid Method to Measure Nitrates in Freshwater to Enhance Student Learning. *Journal of Chemical Education*, 100(6), 2141-2149.
 18. Hanson, R., & Hanson, C. (2022). Catching Learners Early in Humanitarian and Sustainable Principles Through Chemistry Education. In *Modern challenges and approaches to humanitarian engineering* (pp. 213-233). IGI Global.
 19. Holthuijzen, W. A., & Maximillian, J. R. (2011). Dry, hot, and brutal: climate change and desertification in the Sahel of Mali. *Journal of Sustainable Development in Africa*, 13(7), 245-268.
 20. Jegstad, K.M., & Sinnes, A.T. (2015). Chemistry teaching for the future: A model for secondary chemistry education for sustainable development. *International Journal of Science Education*, 37(4), 655-683.
 21. Karpudewan, M. (2016). Malaysian experiences of integrating green chemistry in secondary schools and chemistry teacher education programmes: An exemplary of integrating green chemistry into education, in 24th IUPAC ICCE Conference, Kuching, Sarawak.
 22. Lasker, G. A. (2019). Connecting systems thinking and service learning in the chemistry classroom. *Journal of Chemical Education*, 96(12), 2710-2714.

23. Ma, J., & Shengli, H. (2020). Evaluating Chinese Secondary School Students' Understanding of Green Chemistry. *Science Education International*, 31(2), 209-219.
24. MacDonald, R. P., Pattison, A. N., Cornell, S. E., Elgersma, A. K., Greidanus, S. N., Visser, S. N., ... & Mahaffy, P. G. (2022). An Interactive Planetary Boundaries Systems Thinking Learning Tool to Integrate Sustainability into the Chemistry Curriculum. *Journal of Chemical Education*, 99(10), 3530-3539.
25. Maiga, F., Touré, A. O., Diya, A., Ouattara, I., & Doumbia, S. (2022). Les effets de l'orpaillage par drague sur la biodiversité aquatique de l'affluent Baoulé dans la commune rurale de Kémékafo, région de Dioila. *Revue Africaine des Sciences Sociales et de la Santé Publique*, 4(1), 38-47.
26. Martínez-Borreguero, G., Maestre-Jiménez, J., Mateos-Núñez, M., & Naranjo-Correa, F. L. (2020). Water from the perspective of education for sustainable development: an exploratory study in the Spanish secondary education curriculum. *Water*, 12(7), 1877.
27. MEADD Mali (2017). Ministère de l'environnement et de l'assainissement et du développement durable. Contribution Déterminée au Niveau National révisée (CDN sept 2021).
Extrait de <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/MALI%20First%20NDC%20update.pdf>
28. Nahlik, P, Kempf, L, Giese, J, Kojak, E, Daubenmire, PL. (2023). Developing green chemistry educational principles by exploring the pedagogical content knowledge of secondary and pre-secondary school teachers. *Chemistry Education Research and Practice*.
29. Nguyen, TPL, Nguyen, TH., Tran, TK. (2020). STEM education in secondary schools: Teachers' perspective towards sustainable development. *Sustainability*, 12(21), 8865.
30. OMS. (2022). *Plomb dans l'eau de boisson : risques pour la santé, surveillance et mesures correctives : note technique*. Extrait de <https://www.who.int/fr/publications-detail/9789240020863>
31. Orange, C., & Ravachol, D. O. (2017). Problématisations scientifiques fonctionnalistes et historiques en éducation relative à l'environnement et au développement durable: le cas de l'évolution climatique. *Revue des Hautes écoles pédagogiques et institutions assimilées de Suisse romande et du Tessin*.
32. Orange, C. (2005). Problématisation dans l'enseignement scientifique. *ASTER, Problème et problématisation*, 40, 3-11.
33. Orgill, M., York, S., & MacKellar, J. (2019). Introduction to systems thinking for the chemistry education community. *Journal of Chemical Education*, 96(12), 2720-2729.

34. Sauvé, L. (2017). Une diversité de courants en éducation relative à l'environnement. Dans A. Barthes. et J.-M. Lange (Dir.), *Dictionnaire critique des enjeux et concepts des Éducatrices à*. (113-124), Paris : L'Harmattan.
35. Sissoko, M. F. (2019). Double rationalité sur l'orpillage traditionnel au Mali. *Revue Africaine des Sciences Sociales et de la Santé Publique*, 1(2), 101-115.
36. Soudani, M. (2014). Le concept d'oxydoréduction: Analyse épistémologique et didactique, Editions universitaires européennes, Paris.
37. Sund, P., & Gericke, N. (2020). Teaching contributions from secondary school subject areas to education for sustainable development – a comparative study of science, social science and language teachers. *Environmental Education Research*, 26:6, 772-794, DOI: <https://doi.org/10.1080/13504622.2020.1754341>
38. Taber K. S., (2013), Revisiting the chemistry triplet: drawing upon the nature of chemical knowledge and the psychology of learning to inform chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 14(2), 156–168.
39. Thimmappa, B. H. S. (2023). Perspectives on general aspects of pollution toxicology. *African Journal of Chemical Education*, AJCE 13(1), 240-292.
40. Tounkara, S. M., Mohamed, S. (2022). Titolazioni acido-base e soluzioni saline come supporto per lo sviluppo di competenze scientifiche, epistemologiche e didattiche. *La Chimica nella Scuola*, 5, 53-61.
41. Tounkara, S. M., Diawara, M., & Soudani, M. (2020). Appropriation par des enseignants du secondaire de la situation-problème dans le cadre de la réforme curriculaire au Mali. *European journal of education studies*, 7(3), 187-198.
42. Traore, M. M., Touré, A. O., Kone, H., & Ly, O. (2022). Impacts des rejets des effluents industriels sur la qualité des eaux du fleuve Niger à Bamako. *Revue Malienne de Science et de Technologie*, 3(27).
43. Tsakeni, M. (2018). Opportunities for Teaching Sustainable Development through the Chemistry Component of CAPS Physical Sciences, *African Journal of Research in Mathematics, Science and Technology Education*, 22(1), 125-136.
44. UNESCO (2021). *Apprendre pour la planète : un examen mondial de l'intégration des questions environnementales dans l'éducation*. Extrait de https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000377421_fre

45. UNESCO (2017). *L'Education en vue des Objectifs de développement durable : objectifs d'apprentissage*. Extrait de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247507>.
46. UNESCO (2013). *ESD - Building a better, fairer world for the 21st century*. Extrait de <http://u4614432.fsdata.se/wp-content/uploads/2013/09/esd.pdf>
47. UNESCO (1977). *Conférence intergouvernementale sur l'éducation relative à l'environnement Rapport final*, Tbilissi, URSS. Extrait de https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000146295_fre
48. Warliyah, H., Permanasari, A., Rachman, I., & Matsumoto, T. (2023). Low carbon e-book on climate change with education for sustainable development framework for sustainability literacy of 7th grader. *JUPI (Jurnal IPA dan Pembelajaran IPA)*, 7(4), 317-334.
49. Zahir, I., Iyadayan, O., Ettaki, M., Monasef, M. (2019). L'éducation environnementale à l'Université Sultan Moulay Slimane (Maroc). *European Scientific Journal* November 2019 edition 15(33), 298-337. Doi:10.19044/esj.2019.v15n33p298