

Journées de l'interdisciplinarité



29 juin & 30 juin 2023



**LES JOURNÉES DE
L'INTERDISCIPLINARITÉ**

journees.interdisciplinarite@unilim.fr



**Les journées de
l'interdisciplinarité**

Résilience alimentaire des territoires : Apports de l'interdisciplinarité dans l'étude des fermes paysannes

Margaux Alarcon

INRAE UR ETTIS

margaux.alarcon@gmail.com

Nicole Pignier

EHIC

nicole.pignier@unilim.fr

Solène Lemichez

INRAE UMR BAGAP

solene.lemichez@inrae.fr

Mots clés : agriculture, agroécologie, résilience, systèmes alimentaires, relations au vivant, semences paysannes ; paysage nourricier

Introduction

Les récentes crises sanitaires, environnementales, économiques et politiques à différentes échelles ont mis en évidence le fait que les systèmes alimentaires, c'est-à-dire l'organisation des différents acteurs et des fonctions pour nourrir une population donnée (De Kermel et al., 2022), font face à de nombreuses vulnérabilités. En effet, certaines perturbations brutales telles les catastrophes climatiques, les épidémies et tendanciennes tels les changements graduels dans l'utilisation des sols fragilisent leur capacité à assurer la sécurité alimentaire (Zurek et al., 2022). En France notamment, la pandémie de covid-19 a conduit à de nombreux bouleversements des chaînes alimentaires. Certaines perturbations dans les circuits de distribution ont en effet accru les difficultés de divers publics, par exemple les étudiant.e.s, à accéder à une alimentation de qualité en quantité suffisante. Dans le même temps, l'expérimentation d'innovations pour réorganiser localement certains circuits de distribution et la mise en place de nombreuses formes de solidarité ont aussi montré la capacité des territoires et de certains acteurs dont les agriculteurs et les agricultrices à s'adapter, à résister face au choc. Cela, afin d'assurer l'accès à l'alimentation pour tous et toutes (Corade et al., 2022). Cependant, la pandémie a révélé la fragilité du système alimentaire mondialisé dominant. Celui-ci est en effet exposé à des chocs et à des perturbations tendanciennes nombreuses. Les conséquences de ces dernières sont renforcées par des facteurs de fragilités intrinsèques à la structuration de ce système tel le manque de diversité productive. Dans la conjoncture économique actuelle, la hausse de la précarité alimentaire à l'échelle nationale constitue l'un des principaux marqueurs de l'incapacité du système alimentaire actuel à garantir un accès durable à l'alimentation pour les populations (Bléhaut et Gressier, 2023).

Dans cette situation, on observe un intérêt grandissant de la part des acteurs politiques pour la résilience et la souveraineté alimentaires. Ainsi, le concept de *résilience* est de plus en plus mobilisé ces dernières années dans le cadre des politiques publiques nationales en matière d'alimentation (Becerril Nito, 2023). Rarement défini de manière claire, le terme est pourtant souvent associé à celui de *souveraineté alimentaire*, qui renvoie au droit des populations, des communautés et des pays à définir leurs propres politiques alimentaires et agricoles. Les définitions récentes de la résilience retiennent des aspects issus de l'écologie et des sciences de l'ingénieur, à travers le maintien de la persistance du fonctionnement face aux perturbations, y compris le potentiel de réorganisation interne des interrelations du système (Weise et al., 2020). L'on peut définir de façon préliminaire la résilience comme la capacité du système alimentaire à assurer ses fonctions en dépit de chocs et de perturbations. Au sein de celui-ci, l'existence d'une grande diversité d'acteurs laisse supposer que tous les acteurs n'ont pas la même définition et la même perception de ce que sont la résilience et les facteurs de résilience du système alimentaire (Tendall et al., 2015). Dans cette perspective, cet article s'intéresse à la façon dont les productrices et producteurs envisagent la résilience de leur activité. Qu'énoncent les agriculteurs et les agricultrices au sujet de la résilience de leurs fermes ? À quelles formes de résilience renvoient leurs discours et leurs pratiques ?

Cette étude prend place dans le cadre d'un programme de recherche sur la sécurité et la résilience alimentaires en Nouvelle-Aquitaine (SEREALINA). Le programme de recherche-action multipartenarial SEREALINA, né à la suite de la pandémie de covid-19, rassemble quarante chercheurs et chercheuses de sciences humaines et sociales en Nouvelle-Aquitaine. Les travaux conduits dans ce cadre visent tout d'abord à déterminer comment est assurée à l'échelle régionale, la *sécurité alimentaire*, c'est-

à-dire le fait que tous les êtres humains ont, à tout moment, la possibilité physique, sociale et économique de se procurer une nourriture suffisante, salubre et nutritive, leur permettant de satisfaire leurs besoins et préférences alimentaires pour mener une vie saine et active (FAO 2008). Ensuite, le programme SEREALINA vise à caractériser la durabilité et la résilience des systèmes alimentaires de la Nouvelle-Aquitaine. Enfin, il prévoit de déterminer les changements et les actions nécessaires pour assurer une meilleure sécurisation alimentaire et une plus grande durabilité du développement des territoires. C'est dans ce cadre que notre enquête sur la résilience des fermes paysannes a pris part. Nous entendons par *ferme paysanne* un organisme agricole où est cultivée une diversité d'espèces végétales - dont des semences paysannes - et/ou animales - dont des races rustiques - , par une personne ou un collectif se revendiquant comme *paysan.ne* du fait de son lien à un lieu, à un *païs*, avec des modes de production liés à l'agriculture biologique non industrielle, l'agroécologie, la biodynamie ou toute forme d'agriculture dite « alternative » comme la permaculture, l'agroforesterie ... (Estève, Hervé et Giuliano, 2019).

Dans un premier temps, nous expliquerons comment la résilience alimentaire est devenue une question de recherche majeure des études sur les systèmes alimentaires. Nous montrerons, à partir de la littérature scientifique, les concepts et les étapes nécessaires pour l'analyser sur les territoires et auprès des acteurs. Dans un deuxième temps, nous présenterons la méthodologie compréhensive en écosémiotique conduite au sein de fermes de l'ex-Limousin et du Béarn. Dans un troisième temps nous détaillerons les principaux résultats : les chocs perçus par les *paysan.ne.s*, leurs aspirations, la ou les forme(s) de résilience qui émerge(nt). Enfin, nous discuterons de la contribution de ces travaux aux études sur les facteurs de résilience notamment au sein des fermes paysannes. Les recherches participatives qui y sont menées permettent-elles d'enrichir les catégories d'analyse de la résilience ?

La résilience : un objet d'étude majeur parmi les travaux sur les systèmes alimentaires

La littérature récente fait état d'une évolution quant aux façons d'évaluer les systèmes alimentaires à différentes échelles. En effet, historiquement, la majorité des travaux à l'échelle internationale ont principalement porté sur l'évaluation de la durabilité des systèmes alimentaires mondiaux (FAO, 2023). L'analyse de la résilience était quant à elle réservée aux systèmes alimentaires du Sud Global (Becerril Nito, 2023). Ainsi, de nombreuses études passées et en cours portent attention à l'élaboration de grilles d'évaluation de la durabilité de systèmes alimentaires. Cela, à partir de l'analyse de différentes catégories traduites ensuite en indicateurs, en particulier la viabilité économique, le bien-être social, la durabilité environnementale, la gouvernance et l'accès à la sécurité alimentaire (Zurek et al., 2018 ; Jacobi et al., 2020). Plus récemment, on observe la multiplication des publications sur la résilience des systèmes alimentaires dans une situation de crises multiples les affectant. Ces travaux questionnent leur capacité à s'adapter à différentes perturbations, notamment les crises sanitaires, les effets des dérèglements climatiques en cours et à venir.

Historiquement, le concept de résilience trouve son origine dans la littérature anglo-saxonne et a été en particulier appliqué par Holling (1973) aux systèmes écologiques. De nombreux travaux ont ensuite exploré les liens entre résilience écologique et résilience sociale. Ainsi, au cours des années 2000, il

s'agissait principalement d'interroger les composantes de la résilience des systèmes socio-écologiques telles que l'adaptation et la transformation (Adger et al., 2005 ; Folke, 2006). À la même époque, une deuxième approche a questionné la résilience de systèmes agricoles à partir d'études de cas et de propositions de politiques publiques dans les pays du Sud Global (Pingali et al., 2005 ; Alinovi et al., 2008). C'est à partir des années 2010 que l'approche systémique de la résilience, visant une analyse multi-échelles et multi-niveaux des interactions au sein du système alimentaire se consolide. Elle met en évidence le fait que les impacts des crises, des chocs et des perturbations tendanciels (ou *stress*) sont perçus de manières différenciées, individuelle ou systémique (Béné, et al., 2012 ; Barret, et al., 2014 ; Tendall et al., 2015).

Une revue de littérature publiée en 2022 permet de faire la synthèse des enjeux associés à l'étude de la résilience des systèmes alimentaires (Zurek et al., 2022). Les autrices et auteurs de cette publication repèrent que la résilience peut être appréhendée comme objectif et comme stratégie concernant une grande diversité de perturbations, d'échelles temporelles et de fonctions du système alimentaire. De plus, la façon de considérer ces objectifs peut varier en fonction des actrices et des acteurs. Les autrices et auteurs proposent ainsi de cadrer le concept à partir de 4 questions principales (Helfgott 2018). Premièrement, il s'agit d'identifier à quoi font référence les acteurs du système alimentaire lorsqu'ils parlent de résilience. À quels chocs, à quels stress et à quels risques font-ils face sur leurs territoires ou dans leurs activités ? Ensuite, il est essentiel d'identifier les fonctions, les activités ou les objectifs qui sont visés : s'agit-il de préserver la résilience du système alimentaire dans son ensemble ou de l'une de ses fonctions spécifiques ? Troisièmement, il est important de situer les perceptions, les discours et de déterminer quels acteurs s'expriment sur la résilience. Enfin, il faut interroger les échelles temporelles visées, à court, moyen, ou long terme lorsque les perturbations et les facteurs de résilience sont envisagés par les acteurs eux-mêmes. Le deuxième apport majeur de cette revue de littérature est de rappeler, à partir des travaux de Tendall (2015), que différentes formes de résilience peuvent exister. En effet, cette dernière peut prendre la forme de la *robustesse*, c'est-à-dire la capacité à résister à un choc, fondée sur l'aptitude des acteurs du système alimentaire à adapter leurs activités pour résister aux perturbations des résultats souhaités. Elle peut aussi prendre la forme de la *récupération*, c'est-à-dire la capacité à revenir, après perturbation, à un état initial de fonctionnement. Enfin, elle peut prendre la forme plus transformative de la *réorientation*, qui implique l'acceptation d'autres résultats du système alimentaire avant ou après une perturbation. La réorientation repose sur le principe que la modification des attentes/exigences sociétales concernant les résultats du système, les façons de les obtenir peut renforcer la résilience de celui-ci en le rendant intrinsèquement moins vulnérable aux chocs et aux stress.

Des études en agronomie et biologie montrent que les productions menées dans les fermes paysannes sont capables de nourrir sainement et durablement les populations en respectant l'intégrité des vivants et des territoires (Dufumier, 2023 ; Chable, 2018). Aussi est-il pertinent, au niveau du territoire Nouvelle-Aquitaine de porter attention à ce que des productrices, producteurs en agriculture paysanne biologique expriment de la résilience de leur ferme. Cela vient-il confirmer ou infirmer les travaux sus cités ?

Une approche de la résilience des fermes paysannes de façon compréhensive

Dans le cadre du programme de recherche SEREALINA, nous posons que l'étude de la résilience peut se faire de deux façons complémentaires, à partir des travaux de Zurek et al. (2022). D'une part, une analyse compréhensive des stratégies de résilience de la part des acteurs des systèmes alimentaires permet d'identifier comment est institutionnalisée, vécue, pensée, pratiquée de façon différenciée la résilience alimentaire au sein des systèmes alimentaires, en fonction des acteurs, des territoires, des fonctions étudiées. Dans cette perspective, ces travaux sont invités à considérer notamment la part d'adaptation ou de transformation radicale des activités (Wilson et al., 2020), à caractériser les espaces et les échelles d'actions envisagées pour renforcer la résilience. En outre, ils consistent à étudier comment la résilience est négociée parmi les acteurs des systèmes alimentaires (Jacobi et al., 2018). D'autre part, nous posons qu'il est possible également de mesurer la résilience des systèmes alimentaires à partir de l'identification de facteurs de résilience, de la mobilisation de variables et d'indicateurs (Alarcon et al., 2023).

Cette étude qui vise à comprendre ce que les producteurs et les productrices énoncent au sujet de la résilience de leur ferme et des systèmes alimentaires de leur territoire s'inscrit dans une analyse compréhensive de la résilience, telle qu'elle est proposée dans le cadre du programme de recherche SEREALINA. Il s'agit de questionner a posteriori les (inter)actions et les propos des productrices, producteurs. Cela concerne, à ce stade 22 fermes de l'ex- Limousin et du Béarn, deux territoires que plusieurs centaines de kilomètres séparent et dont les spécificités géographiques sont distinctes. Le choix de deux « échantillons » territoriaux différents permet une première approche qualitative comparative. L'étude est menée selon une démarche écosémiotique (Pignier, 2022 ; Pignier, 2020) qui questionne les relations aux vivants et à la terre/Terre dans les manières de produire la nourriture. En quoi la résilience alimentaire qui s'énonce dans les fermes et les paroles des productrices, producteurs concerne -t-elle aussi la vitalité humaine c'est-à-dire les forces duales et complémentaires qui nous structurent telles que la verticalité, le rapport individu-collectif (Pignier, 2023 : 31) ? Quelles relations entre vitalité humaine, vitalité du sol, de la nourriture, du paysage, du territoire fonde l'appréhension de la résilience alimentaire chez les productrices et producteurs concerné.e.s par cette étude ?

La démarche se structure en un cycle de 4 temps. Le temps 1 est une phase d'imprégnation. Il s'agit de rencontrer les personnes en des lieux différents dont la ferme, les marchés, les événements associatifs, culturels, ... Autant d'occasions de porter attention à la sensibilité qui s'exprime dans leur énonciation, leurs gestes, leur ferme de la graine au paysage. Le temps 2 est celui de l'analyse des dynamiques perceptives, énonciatives à partir des notes et des enregistrements. Le temps 3 consiste à confronter nos analyses au terrain en participant/généralisant d'autres rencontres, actions, échanges, auxquels participent les paysannes et paysans mais aussi en sollicitant leur appréciation des éléments marquants issus de notre analyse. Enfin, le temps 4 est celui de l'ajustement de nos démarches, méthodologies, analyses. Nous retournons ensuite au temps 1 avec de nouvelles et nouveaux paysan.ne.s. Ce type de démarche s'inscrit dans un paradigme de recherche proche de celui de la sélection participative multi-acteurs, conduite depuis plus de vingt ans au niveau européen en lien avec des collectifs de paysan.ne.s, notamment en France (Bonneuil & Demeulenaere, 2007). La posture de recherche consiste ici non pas

à s'extraire du monde agricole pour l'observer et en tirer des recommandations, mais bien à considérer la parole des praticien.ne.s, leurs savoir-faire comme permettant une mise à l'épreuve réciproque entre recherches académiques, savoirs et pratiques paysan.ne.s. Un questionnement coopératif qui permet de faire évoluer des problématiques communes et les réponses possibles (Serpoly et al., 2018). L'approche compréhensive de la résilience selon les productrices, producteurs part ainsi de l'hypothèse suivante : elles, ils peuvent faire émerger de nouveaux indicateurs et facteurs de résilience. À quelles formes de résilience renvoient les paroles et pratiques des paysans et paysannes à l'échelle de leur ferme ? Sont-elles/ils confronté.e.s à des chocs ? Si oui, lesquels ? À quelles évolutions de leur structure et du territoire/des territoires aspirent-elles/ils ? Sur quels leviers peuvent-elles/ils compter ? Quelles pistes proposent-elles/ils ? À quels obstacles se heurtent-elles/ils ?

Résultats

Les chocs. Quand l'industrialisation mondialisée de l'agriculture affecte la relation paysanne au sol, aux plantes, aux animaux.

L'ensemble des paysan.ne.s concerné.e.s par l'étude vivent et expriment dans le même sens le choc fondateur des perturbations profondes qui constituent des menaces pour la souveraineté alimentaire : l'agriculture industrielle mondialisée. Selon elles et eux, l'industrialisation a mis à mal le lien sensible, pratique entre les paysan.ne.s, les sols, les semences, la complexité culturelle et culturelle du lieu. Nathalie, paysanne dans le Béarn, s'indigne de la perte quasi-totale des aptitudes à s'imprégner des situations, complexités vivantes, à les sentir, à les comprendre : « *Il est où le lien à la terre ? On est complètement déconnecté.e.s* ». Pour elles et eux, la relation de domination des vivants et de la terre qui s'est instaurée avec l'agriculture industrielle affecte le sens de leur métier mais plus encore leur vitalité, c'est-à-dire leurs aptitudes à se sentir vivant.e.s parmi les autres vivants. Cette anesthésie (Pignier, 2023 : 55) concerne aussi les semences qui, industrialisées, ont perdu leur intégrité, les sols, les paysages vidés de leur vitalité, pollués. Au final, une léthargie qui affecte l'alimentation standardisée. Ces constats partagés rejoignent de nombreux travaux scientifiques en agronomie et biologie, démontrant à l'échelle globale l'impact de l'agriculture industrielle sur la perte de biodiversité (Dudley & Alexander, 2017). À cela s'ajoute une prise de conscience grandissante des effets délétères de l'agro-industrie et l'alimentation standardisée sur la santé publique (Van den Broeck et al., 2010).

Les aspirations. Elever des paysages nourriciers pour les humains, la biodiversité, le territoire

L'ensemble des paysan.ne.s impliqué.e.s dans l'étude souhaitent restaurer le rapport sensible aux vivants. Cela, en partant notamment des semences, l'un des fondements des agricultures paysannes. La sélection et la multiplication des plantes a été, jusqu'à la révolution industrielle, le travail des paysans et paysannes, indissociable de leur activité agricole. La professionnalisation de cette pratique, notamment à cette époque par la famille Vilmorin, a conduit peu à peu à une dissociation entre production agricole et production de semences. Au cours du XXe siècle, cette dernière devient un secteur lucratif pour de grandes firmes de l'agro-industrie, dont certaines explorent la voie des organismes génétiquement modifiés (OGM). Dans les années 2000, des mouvements citoyens appuyés par des scientifiques mettent

la question des OGM au cœur des débats publics. Les semences paysannes revêtent alors une dimension plus politique, en réaction au système agro-industriel, et des organisations collectives voient le jour en Europe, par exemple en France avec le Réseau Semences Paysannes (Demeulenaere, 2019). Les semences paysannes sont aussi devenues un élément clé des agricultures dites alternatives, de par le fait qu'elles ne peuvent se réduire à une simple dimension génétique (Chable et al., 2021). Cette dimension holistique des semences paysannes, notamment leur lien au sol et au lieu via leurs capacités d'adaptations à différentes situations agricoles (Ceccarelli & Grando, 2007), invite les paysan.ne.s à une connaissance approfondie de leur milieu. Guy, paysan en limites de la Charente limousine explique :

« La base, c'est le sol on va dire. Donc le sol, le ressenti de la terre. Le ressenti et l'odeur de la terre, ça, c'est primordial. Une odeur qui a une odeur de champignon ou de sous-bois, c'est une terre fertile [...]. C'est surtout ça. Au niveau du sol, il faut toujours toucher la terre. Moi, je touche en permanence la terre, je gratte, je regarde. Si la décomposition des anciennes pailles s'est bien faite ou si on retrouve de la paille des années d'avant qui s'est mal décomposée, alors, il faut se remettre sans cesse en question pour pouvoir pallier ces choses-là ».

Pour les paysan.ne.s, chaque diagnostic, décision peut se faire selon les aptitudes sensibles à connaître sa ferme en tant que complexité vivante tant culturelle - les manières de nommer, dire, de raconter, que géographiques, écologiques, climatiques, agronomiques. Sophie, vétérinaire ostéopathe et paysanne avec son compagnon en Charente limousine, explique que les savoirs et savoir-faire pour soigner soi-même ses plantes, ses animaux, nécessitent d'entrer en résonance avec l'animal, le végétal, le lieu et son ambiance :

« De plus en plus, les paysans sont en train de se réapproprier ce qui s'était perdu à un moment par l'arrivée de la médecine moderne, l'intervention avec les médicaments, les anti-parasitages, [...] Dans leur rapport au soin, y'a aussi cette idée d'empathie qui me plaît bien ; y'a une certaine lecture du paysage, y'a une humilité face au vivant, on n'est pas là pour contrôler, maîtriser, quantifier, mesurer, solutionner, on est là pour être en écoute et voir ce qui s'impose à nous ».

Se réapproprier le soin consiste à s'ajuster à l'ensemble au lieu de le dominer (Landowski, 2005 ; Pignier, 2022 ; Alarcon, 2020), à laisser travailler de concert les savoirs sensibles, symboliques, techniques et scientifiques d'où émerge l'équilibre entre les capacités d'empathie, d'accueil et celles de l'action, de l'intervention qui composent la vitalité de chaque humain.e (Pignier, 2023 : 14-31). La manière sensible ou « *impressive* » d'accueillir les phénomènes, de connaître consiste à suspendre « *la vision conventionnelle* », et, « *tout simplement, à se livrer à l'impression immédiate [...] elle donne accès aux formes, aux valeurs par l'intermédiaire de pures qualités et quantités perceptives, perçues globalement, sans analyse.* (Fontanille, 1998 : 228).

En s'insérant dans un questionnement global sur les relations entre humains et nature (Mace, 2014 ; Folke et al., 2021), l'agriculture biologique, l'agroécologie ou encore la biodynamie proposent ainsi, au-

delà de solutions techniques, de nouvelles conceptions des rapports entre vivants humains et non humains (Rigolot, 2017 ; Foyer et al., 2020). Cette rupture du rapport utilitariste et matérialiste entre nature et culture et entre humains et non-humains s'est illustrée d'un point de vue théorique dans de nombreux travaux d'anthropologie (Descola, 2005 ; Viveiros de Castro, 2009 ; Latour, 2013), dans un premier temps pour les relations entretenues avec les animaux avant de s'étendre au domaine végétal (Pouteau, 2014). Dans une forme d'*ontological turn*, ce *plant turn* a cependant longtemps passé sous silence les relations aux plantes cultivées (Foyer et al., 2020). De nouvelles ontologies semblent pourtant émerger, notamment dans les agricultures paysannes où celles-ci se teintent d'une dimension politique (Demeulenaere, 2014), à laquelle se superpose souvent une dimension plus spirituelle. Dans ces ontologies, l'attention à la diversité et au caractère évolutif du vivant est centrale ; elle fonde des rapports sensibles et émotionnels aux plantes qui autorisent la coopération entre les humains et les vivants non-humains (Alarcon et Marty, 2023).

Ainsi, en coévoluant avec le lieu où elles, ils produisent, les paysan.ne.s laissent émerger une ferme-microcosme faite de multiplicités d'échelles, de la graine à la forêt, en prenant en compte le lien au territoire, aux rivières, aux fleuves, au macrocosme : la Terre. Une interaction entre le local et le global en phase avec ce qui constitue l'*anthropos* qui, tout en ayant besoin de lieux pour vivre en circonstances, peut se représenter symboliquement l'absent, ce qui dans le temps comme dans l'espace, n'est plus là, pas encore là. Ainsi, les semences qui s'échangent parlent des sols d'où elles proviennent, des gens et des paysages. Dans leurs voyages, les graines paysannes germent, font racine puis à nouveau repartent en partage. Ce faisant, on cultive les semences paysannes en lien avec les lisières, les lieux d'échange entre l'extérieur et l'intérieur. Pour cela, les productrices, producteurs prennent soin des bordures, des passages, des flux souterrains où l'eau, le sol, l'air, le minéral et tous les vivants travaillent ensemble. Les fermes-microcosmes favorisent les haies, les bosquets, la forêt (Pignier, 2023 : 55-56). L'aspiration à un équilibre entre extérieur/intérieur se fait en phase avec les échanges entre dedans et dehors par lesquels se forme notre microbiote, cette « *contexture microbienne* » (Selosse, 2017 : 170) dont dépend notre vitalité. Les semences paysannes ont ainsi la capacité de faire société avec les autres vivants peuplant leur milieu tels que les bactéries et champignons composant leur microbiote.

Les travaux de S. Mauger et al. (2021) ont en effet mis en évidence des communautés de microorganismes significativement différentes entre blés paysans et blés modernes. Ces derniers s'associent notamment à davantage d'organismes pathogènes, permettant de conclure une meilleure appréciation de leur environnement par les semences paysannes, ainsi qu'une capacité de faire société avec les microorganismes plus développée.

En aspirant à des manières de faire où s'ajustent vitalité humaine, vitalité des plantes, des animaux, du sol, des lieux, des paysages, les paysan.ne.s prennent soin autant de la vie dans le sol que de ce qui pousse au-dessus. Pour ce faire, elles, ils laissent s'exprimer les tensions entre hauteur et profondeur en favorisant la multiplicité des strates végétales (Pignier, 2023 : 71). Ces tensions s'illustrent particulièrement dans les systèmes agroforestiers, où une diversité de cultures cohabite dans différentes strates : des espèces pérennes ligneuses - arbres ou buissons – créent des micro-environnements en amenant par exemple un effet tampon sur les variations de température et de précipitation, une résistance à la sécheresse, un effet brise-vent, une réduction de l'érosion des sols, des apports en matière

organique, mais aussi une sécurité financière grâce à la ressource en bois (Quandt et al., 2019). Dans ce type d'environnement complexe, intégrant une multiplicité de facteurs biologiques, la sélection paysanne s'avère particulièrement pertinente dans la mesure où elle permet une adaptation des cultures à des situations agricoles particulières (Lemichez, 2020). En prenant soin des interactions entre hauteur et profondeur, les productrices et producteurs laissent s'exprimer les tensions qui animent notre verticalité, notre respiration cellulaire dont dépend notre vitalité (Pignier, 2023 : 71).

Elles/ils considèrent que la résilience alimentaire émerge également de la diversité cultivée. La plupart des systèmes agricoles dits conventionnels reposent sur la monoculture, ou parfois sur l'association de quelques espèces. Cela, la plupart du temps en utilisant des variétés ne comportant qu'un seul génotype c'est-à-dire une lignée pure ou un hybride, où chaque individu-plante est identique aux autres. Au contraire, les semences paysannes se structurent en *populations* : pour une même espèce, ces populations sont faites d'une diversité d'individus ayant des génomes différents, issus d'une coévolution entre environnement, pratiques agricoles et sensibilité humaine. À cette diversité intra-spécifique s'ajoute une diversité inter-spécifique, dans la mesure où l'activité paysanne repose sur la culture de différentes espèces au sein d'un même organisme agricole. Cette imbrication de différents niveaux de diversité a été identifiée comme l'un des facteurs clefs de la résilience des fermes paysannes. (Cabell & Oelofse, 2012 ; Enjalbert et al., 2011).

Au-delà d'une appréhension purement génétique du vivant, la résilience est une question d'interactions entre différentes formes de vies, dont les paysan.nes font partie. Pour beaucoup, l'attention constante au sol est avant tout une attention aux micro-organismes qui le composent, puisque ces derniers nourrissent une multitude de relations avec les plantes en constituant leur microbiote. L'ubiquité des relations symbiotiques chez les organismes pluricellulaires a notamment conduit à l'émergence de l'hypothèse *holobionte* (Margulis, 1981), qui considère un organisme hôte (par exemple une plante) et l'ensemble des micro-organismes qui lui sont associés comme une seule et même entité dynamique. L'implication de ces organismes dans une multitude de processus tels que l'adaptation aux stress biotiques et abiotiques leur confère un rôle crucial dans l'évolution des plantes (Vandenkoornhuysse et al., 2015). Ce changement de paradigme a élargi la notion d'hérédité, puisqu'une partie de ces micro-organismes se transmet de génération en génération, notamment par les graines chez les plantes (Berg & Raaijmakers, 2018 ; Chable et al., 2021). Ce bouleversement des théories fondamentales de l'évolution induit de nouvelles conceptions de l'identité (Rosenberg et al., 2009 ; Rees et al., 2018), un changement de regard sur les microbes (Partida-Martínez & Heil, 2011) et plus généralement sur les rapports au vivant. Il s'agit là d'une interaction entre individu et collectif en phase avec notre vitalité. Si une signature génétique caractérise chaque humain.e, les liens que nous tissons avec nos lieux de vie en respirant, en nous nourrissant, en nous cultivant participent aussi à l'évolution de notre expression génétique (Quintana-Murci, Lluís, 2020). Les relations que nous tissons avec les choses et les êtres vivants nourrissent notre vie biologique, sociale dans une interaction continue entre individu et collectif (Pignier, 2023 : 37).

Les paysan.ne.s concerné.e.s par l'étude aspirent par conséquent à des manières de produire qui nourrissent le lien sensible au sol, aux humains, aux vivants, au paysage, au territoire. Pour ce faire, elles/ils s'ajustent à la terre/Terre en laissant s'exprimer les forces duales et complémentaires à l'œuvre

dans la vitalité humaine : agir et ressentir ; s'ajuster aux circonstances locales en nourrissant la pensée symbolique globale ; prendre soin des échanges entre corporéité intérieure et l'environnement ; favoriser la complexité verticale entre hauteur et profondeur ; être attentif à la transmission entre individu et collectif. S'élèvent ainsi des paysages nourriciers, de la graine au territoire, où vitalités humaines individuelle, collective et vitalités locale, globale font concrescence (Pignier, 2023).

Les obstacles. Des mesures et calculs biaisés

Selon les paysan.ne.s, les obstacles à la restauration de manières de produire de la nourriture favorables à la vitalité du sol, des plantes, des animaux, des humains sont nombreux. Politiques tout d'abord. La majorité des élu.e.s ont une profonde méconnaissance de ce qui différencie par exemple l'agriculture paysanne biologique d'une agriculture labellisée Label Rouge ou Haute Valeur Environnementale. Plus encore, elles/ils assimilent souvent une alimentation « locale » émanant de leur territoire à une alimentation « biologique ». Les règles des appels d'offre pour les collectivités dont les écoles sont adaptées aux standards de l'agro-alimentaire et ne permettent que très peu de souplesse en cohérence avec la variabilité quantitative, saisonnière sur laquelle reposent les productions paysannes. La Politique Agricole Commune joue en défaveur du maintien en agriculture biologique ; les aides pour ce faire sont réorientées en faveur du label Haute Valeur environnemental qui ne répond pas aux exigences d'une alimentation saine et durable pour les territoires (Casalegno, 2021). Selon les productrices et producteurs, même si de plus en plus de personnes souhaitent sur leur territoire voir se multiplier les initiatives d'agriculture paysanne biologique, la majorité de la population reste dans une confusion relative aux enjeux de l'alimentation. Ces constats rejoignent les formulations de l'agronome Marc Dufumier (2023). Ce dernier demande à ce que les nombreux services d'intérêt général rendus par l'agriculture paysanne biologique soient rémunérés par les politiques publiques. Leur coût en effet ne masque aucune externalité ; les collectivités n'ont à financer aucune dépollution, aucune prise en charge liée à des maladies alors que le coût d'achat de l'alimentation en provenance d'autres types d'agriculture même labellisée masque les coûts restant à charge des collectivités.

Pour finir

En prenant en compte les pratiques et savoirs situés des paysan.ne.s, les recherches participatives à partir desquelles a posteriori nous avons ici interrogé la résilience alimentaire mettent à l'épreuve les cadrages conceptuels mobilisés dans la recherche scientifique. En l'occurrence, les paysan.ne.s avec qui nous coopérons nous font comprendre qu'un système alimentaire résilient nécessite une alimentation non aseptisée, non standardisée, résultant de pratiques non anesthésiées. Elles et ils œuvrent à une alimentation nourricière pour notre vitalité physique, psychique. Pour ce faire, leurs pratiques laissent s'exprimer la vitalité humaine en phase avec celle des lieux, des vivants, de la Terre. De telles pratiques par lesquelles s'élèvent des paysages nourriciers refusent donc une forme de résilience centrée sur la robustesse ; il ne s'agit surtout pas d'essayer, coûte que coûte, de continuer à produire de l'alimentation en portant atteinte à l'intégrité des plantes, à la santé des sols, à notre santé physique comme psychique. L'agriculture paysanne biologique travaille ensemble la récupération, en retrouvant des savoirs et savoir-faire niés, oubliés, liés aux semences, aux interactions entre les éléments naturels, et la réorientation en ouvrant des voies ingénieuses avec la société civile, la recherche et en innovant pour

façonner des outils, techniques respectueux des sols, des lieux, des paysan.ne.s, du paysage. La recherche scientifique assume dès lors sa part vivante, humaine, sensible en coopération avec l'ingéniosité paysanne, citoyenne (Chable, 2018).

Comme le soulignent Zurek et al. (2022), il est essentiel de faire participer les acteurs des territoires à la définition des termes et à l'élaboration des stratégies de résilience sur les territoires. Le travail de terrain conduit dans le Béarn et l'ex-Limousin permet ainsi de mettre en évidence que la réorientation des savoirs et des pratiques agricoles fondées sur la coopération et l'ajustement sensible au vivant peut être un levier pour la résilience de ferme qui nourrissent la vitalité humaine, paysagère, terrestre, de la graine au territoire. En ce sens, l'approche compréhensive de la résilience permet de compléter et complexifier l'approche globale de la résilience alimentaire. En effet, il résulte de ce travail l'importance de considérer comme un facteur de résilience, ou au contraire comme un facteur de vulnérabilité, le type de relation au vivant qui se tisse dans un système socio-écologique donné.

Références

Adger, W. N., Arnell, N. W., & Tompkins, E. L. (2005). Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change*, 15, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.12.005>

Alarcon M., (2020). Prendre soin des plantes et des sols : caractéristiques et transformation des pratiques de care en milieu agricole. Muséum National d'histoire naturelle. Thèse de doctorat.

Alarcon M., Marty P., (2023). Observing farm plots to increase attentiveness and cooperation with nature: a case study in Belgium. *Agric Hum Values*. <https://doi.org/10.1007/s10460-023-10497-5>

Alarcon M., Becerril Nito, V., Del'homme, B., Corade, N. (2023). Proposal for a methodological framework to assess food systems resilience and sustainability in France. XXIXth European Society for Rural Sociology Congress, 3-7 July 2023.

Alinovi, L., Mane, E., & Romano, D. (2008). Towards the measurement of household resilience to food insecurity: applying a model to Palestinian household data. In *Deriving food security information from national household budget surveys. Experiences, achievement, challenges* (pp. 137-152). Food and Agricultural Organization of the United Nations. <https://flore.unifi.it/bitstream/2158/395332/1/Sibrian%202008.pdf>

Barrett, C. B., et Constan, M. A. (2014). Toward a theory of resilience for international development applications. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(40), 14625-14630 <https://doi.org/10.1073/pnas.1320880111>

Becerril Nito, V. (2023). La durabilité et la résilience dans les projets alimentaires territoriaux de Nouvelle-Aquitaine. Mémoire de fin d'étude.

Béné, C., et al (2012). Resilience: new utopia or new tyranny? Reflection about the potentials and limits of the concept of resilience in relation to vulnerability reduction programmes. *IDS Working Papers*, 2012(405), 1-61. <https://doi.org/10.1111/j.2040-0209.2012.00405.x>

Berg, G., & Raaijmakers, J. M. (2018). Saving seed microbiomes. *The ISME journal*, 12(5), 1167-1170

Bléhaut, M., & Gressier, M. (2023). En forte hausse, la précarité alimentaire s'ajoute à d'autres fragilités. Rapport du CREDOC. N°329. ISSN 0295-9976. 4 pages.

Bonneuil, C., & Demeulenaere, E. (2007). Une génétique de pair à pair ? L'émergence de la sélection participative. In Charvolin, F., Micoud, A., et Nyhart, L.K. *Les sciences citoyennes. Vigilance collective et rapport entre profane et scientifique dans les sciences naturalistes*, Ed. de l'Aube, pp.122-147, 2007. (hal-00175991)

Cabell, J. F., & Oelofse, M. (2012). An indicator framework for assessing agroecosystem resilience. *Ecology and Society*, 17(1).

Casalegno, E., (2021), « Label Haute valeur environnementale. Greenwashing de l'agriculture intensive ? *Que choisir*. Lien : <https://www.quechoisir.org/actualite-label-haute-valeur-environnementale-greenwashing-de-l-agriculture-intensive-n87083/>

Ceccarelli, S., & Grando, S. (2007). Decentralized-participatory plant breeding: an example of demand driven research. *Euphytica*, 155, 349-360.

Chable, V. (2018) Regain des semences paysannes. Pour soutenir la diversification de l'alimentation en invitant à changer de regard sur le vivant, revue *Pour*, 2018/2, n° 234-235, p. 63-72.

Chable, V., Lemichez, S., Hohmann, P., Mendes-Moreira, P., Cardoso, H., Klaedtke, S., ... & Nuijten, E. (2021). Report on the holobiont as promising selection target to improve resilience and product quality. LIVESEED project deliverable D3.7.

Corade, N. et.al (2022). Les systèmes alimentaires et agricoles territorialisés : des leviers vers la transition ? *Économie rurale*, 382, 9-15. <https://doi.org/10.4000/economierurale.10548>

De Kermel S., Corade N., Del'Homme B., Boutry M. (2022). Diagnostic du système alimentaire de Nouvelle –Aquitaine. Programme Serealina (Sécurité et résilience alimentaire en Nouvelle-Aquitaine). <https://librairie.ademe.fr/>

Demeulenaere, É. (2019). Savoirs paysans et conservation des ressources génétiques : réductionnisme stratégique et réflexivité. *Anthropologie et Sociétés*, 43(3), 167–192. <https://doi.org/10.7202/1070153ar>

Dufumier M., (2023), Agroécologie et agriculture paysanne, dans *Ecologie et politique* ; 2023/1 (N°66), p. Editions Le Bord de l'eau. P. 95-109.

Dudley, N., & Alexander, S. (2017). Agriculture and biodiversity: a review. *Biodiversity*, 18(2-3), 45-49.

Enjalbert, J., Dawson, J. C., Paillard, S., Rhoné, B., Rousselle, Y., Thomas, M., & Goldringer, I. (2011). Dynamic management of crop diversity: From an experimental approach to on-farm conservation. *Comptes rendus biologiques*, 334(5-6), 458-468

Estève G., Herve M., Simon G., (2019), Agriculture paysanne, *Dictionnaire de l'agroécologie*, Lien : <https://dicoagroecologie.fr/dictionnaire/agriculture-paysanne/>

FAO. (2008). Introduction aux concepts de la sécurité alimentaire, Guides pratiques, sécurité alimentaire : l'information pour l'action, <https://www.fao.org/3/al936f/al936f.pdf>

FAO. (2023). Systèmes Alimentaires, <https://www.fao.org/food-systems/fr/>

Folke., C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 16, 3, 253-267. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002>

Helfgott, A. (2018). Operationalising systemic resilience. *E u r. J. O p e r. R e s.* 268:852–64

Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1, 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>

Jacobi, J., et al. (2018). Operationalizing food system resilience: An indicator-based assessment in agroindustrial, smallholder farming, and agroecological contexts in Bolivia and Kenya. *Land use policy*, 79, 433-446. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.08.044>

Landowski, E. (2005), *Les interactions risquées*, *Revue Nouveaux Actes Sémiotiques*, n°98-100, PULIM.

Lemichez, S. (2020). *Comprendre les performances et l'adaptation de deux variétés-populations de tomate (S. lycopersicum) dans un système agroforestier via l'étude du microbiome racinaire dans le cadre d'une recherche participative* (Doctoral dissertation, INRAE, AGROCAMPUS OUEST).

Mauger, S., Ricono, C., Mony, C., Chable, V., Serpolay, E., Biget, M., & Vandenkoornhuysse, P. (2021). Differentiation of endospheric microbiota in ancient and modern wheat cultivar roots. *Plant-Environment Interactions*, 2(5), 235-248.

Partida-Martínez, L. P., & Heil, M. (2011). The microbe-free plant: fact or artifact?. *Frontiers in plant science*, 2, 100.

Pignier, N., (2020), Approche éco-sémiotique du convivialisme à « l'ère du numérique », in Wallenhorst, Nathanaël ; Mellot, Sandrat et Théviot, Anaïs, *Vers un numérique convivialiste ?*, Paris, collection « Bibliothèque du MAUSS », Editions du Bord de l'eau, pp.45-61.

Pignier, N., (2022). Ecosémiotique des paysages nourriciers. Quand semences et plantes paysannes nous (r)amènent à la terre/Terre, revue *Degrés, Ecosémiotique*, n°188-189, hiver 2021-printemps 2022. P. b1-28.

Pignier, N., (2023). *Paysages nourriciers. Un monde de cultures et de savoirs*. Edts connaissances et savoirs, Paris.

Pingali, P., Alinovi, L., & Sutton, J. (2005). Food security in complex emergencies: enhancing food system resilience. *Disasters*, 29, S5-S24. <https://doi.org/10.1111/j.0361-3666.2005.00282>

Quandt, A., Neufeldt, H., & McCabe, J. T. (2019). Building livelihood resilience: what role does agroforestry play?. *Climate and Development*, 11(6), 485-500.

Quintana-Murci, Lluís (2020), L'influence de notre culture sur notre patrimoine génétique, *Le Journal de la Recherche, Génétique évolutive humaine : la diversité génétique est une richesse*, dossier du 22.01.2020.

Rees, T., Bosch, T., & Douglas, A. E. (2018). How the microbiome challenges our concept of self. *PLoS biology*, 16(2), e2005358.

Rosenberg, E., Sharon, G., & Zilber-Rosenberg, I. (2009). The hologenome theory of evolution contains Lamarckian aspects within a Darwinian framework. *Environmental microbiology*, 11(12), 2959-2962.

Serpoly, E., Nuijten, E., Rossi, A., & Chable, V. (2018). Toolkit to foster multi-actor research on agrobiodiversity. DIVERSIFOOD Project

Tendall, D. M., et al. (2015). Food system resilience: Defining the concept. *Global Food Security*, 6, 17-23

Van den Broeck, H. C., de Jong, H. C., Salentijn, E. M., Dekking, L., Bosch, D., Hamer, R. J., ... & Smulders, M. J. (2010). Presence of celiac disease epitopes in modern and old hexaploid wheat varieties: wheat breeding may have contributed to increased prevalence of celiac disease. *Theoretical and Applied Genetics*, 121, 1527-1539.

Weise H, Auge H, Baessler C, Bärlund I, Bennett EM, et al. (2020). Resilience trinity: safeguarding ecosystem functioning and services across three different time horizons and decision contexts. *Oikos* 129:44556

Wilson RS, Herziger A, Hamilton M, Brooks JS. (2020). From incremental to transformative adaptation in individual responses to climate-exacerbated hazards. *Nat. Clim. Change* 10:200–8

Zurek, M., et al. (2018). « Assessing Sustainable Food and Nutrition Security of the EU Food System—An Integrated Approach» *Sustainability* 10, no. 11: 4271. <https://doi.org/10.3390/su10114271>

Zurek, M., et al. (2022). Food system resilience: concepts, issues, and challenges. *Annual Review of Environment and Resources*, 47, 511-534. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112320-050744>



**Les journées de
l'interdisciplinarité**

Development of 'smart' metal-matrix or metal-dopant antibacterial surface coatings by dry deposition techniques

Développement de surfaces 'intelligentes' antibactériennes par voie sèche suivant deux approches 'matrice métal' et 'dopant métal'

Laurène YOUSSEF

ENSIL-ENSCI, 16 Rue Atlantis, 87280 Limoges France
Univ. Limoges, CNRS, IRCER, UMR 7315, F-87000 Limoges, France
laurene.youssef@unilim.fr

Audrey PROROT

ENSIL-ENSCI, 16 Rue Atlantis, 87280 Limoges France
Univ. Limoges, E2Lim, UR 24133, F-87000 Limoges, France
audrey.prorot@unilim.fr

Alain DENOIRJEAN

Univ. Limoges, CNRS, IRCER, UMR 7315, F-87000 Limoges, France

Laurène GNODÉ

Univ. Limoges, CNRS, IRCER, UMR 7315, F-87000 Limoges, France
Univ. Limoges, E2Lim, UR 24133, F-87000 Limoges, France
Univ. Toulouse III Paul Sabatier, 118 Rte de Narbonne, 31062 Toulouse, France

Thibault MAERTEN

Oerlikon Balzers France SAS, 5 Allée Skylab, F-87280 Limoges, France

Canet ACIKGOZ

Oerlikon Surface Solutions AG, Iramali 18, 9496 Balzers, Liechtenstein

URL : <https://www.unilim.fr/journees-interdisciplinarite/751>

DOI : 10.25965/lji.751

Licence : CC BY-NC-SA 4.0 International

Abstract: The emergence of the SARS-CoV-2 virus in late 2019 shook the scientific community. Research teams from different fields then quickly mobilized to seek adequate and efficient long-term solutions. However, pathogens are not only limited to viruses: bacteria are microorganisms found in all environments and also likely to cause human diseases. One of the possible transmission routes is through contact with surfaces touched by infected people. In this work, coatings with an antibacterial matrix of Cu are developed by plasma spraying at IRCER, Limoges and doped with a photo-catalyst, TiO₂, in order to evaluate the synergy of the two effects on the bactericidal character of Cu. In parallel, TiN coatings with antibacterial dopants (Ag and Cu) elaborated by PVD, are supplied by Oerlikon Balzers, Liechtenstein. All antibacterial tests are carried out at E2Lim, Limoges with the aim of comparing on the one hand the effect of the quantity of a bactericidal element and on the other hand the surface condition of the coating on its ability to destroy pathogens. Results of studies by flow cytometry of the bacteria's enzymatic activity are presented in this work.

Keywords: surface treatments, dry techniques, photocatalysis, antibacterial

Résumé : L'émergence du virus SARS-CoV-2 fin 2019 a secoué la communauté scientifique. Des équipes de recherche de différents domaines se sont alors rapidement mobilisées pour chercher des solutions adéquates et efficaces à long terme. Les agents pathogènes ne sont cependant pas limités aux virus : des bactéries, microorganismes présents dans tous les milieux sont aussi susceptibles de causer des maladies chez les humains. Une des voies de transmission possibles est le contact avec des surfaces touchées par des personnes infectées. Dans ce travail, des revêtements à matrice antibactérienne de Cu sont élaborées par projection plasma à l'IRCER, Limoges et dopées avec un photo-catalyseur, le TiO₂, afin d'évaluer la synergie des deux effets sur le caractère bactéricide du Cu. En parallèle, des revêtements de TiN à dopants antibactériens (Ag et Cu) élaborés par PVD, sont fournis par Oerlikon Balzers, Liechtenstein. Tous les tests antibactériens sont effectués à E2Lim, Limoges avec l'objectif de comparer d'une part l'effet de la quantité d'un élément bactéricide et d'une autre part l'état de surface du revêtement

sur sa capacité à détruire les agents pathogènes. Quelques résultats d'étude par cytométrie à flux de l'activité enzymatique de la bactérie sont présentés dans ce travail.

Mots clés : traitements de surface, voie sèche, photocatalyse, antibactérien

'In the longer run and for wide-reaching issues, more creative solutions tend to come from imaginative interdisciplinary collaboration'

Robert J. Shiller

1. Introduction

Following the emergence of the COVID-19 pandemic in early 2020, efforts in academic research have been doubled in order to offer affordable protection solutions against pathogens. However, pathogens are not limited to viruses. Indeed, bacteria, microorganisms present in all environments, are also likely to cause human diseases. Knowing that these bacteria are ubiquitous especially on surfaces [1], it makes sense to get interested in materials qualified as 'multifunctional' reducing the spread of these microorganisms, as well as decomposing organic and inorganic pollutants using light as an activation source for example [2]. All this with the aim of maintaining a healthy environment, thus meeting the increasingly strict demands of today's society. To return to the subject of materials with antimicrobial potential, copper (Cu) is the oldest metal known to human civilization. Its use dates back to around the 5th millennium B.C. The first medical applications of Cu were mentioned in *Smith Papyrus*, one of the oldest books in history [3]. On the other hand, certain reviews published in recent years discuss the antibacterial potential of 2D materials [4], biomaterials [5] as well as noble metals such as silver (Ag), gold (Au) and platinum (Pt) [6].

These works present metallic elements as the most promising in terms of antimicrobial and fungicidal efficacy. However, in their massive state, these elements remain relatively expensive and toxic *in vivo* and *in vitro* if present in large quantities. Indeed, Cu is an essential 'trace' element in living organisms and participates in the composition of more than 30 proteins known today such as *tyrosinase* (melanin synthesis), *lysyl oxidase* (collagen cross-linking) or *cytochrome C oxidase* involved in the regulation of the respiratory chain [7]. As for silver, at cumulative doses of around 70 to 150 mg.kg⁻¹ of body weight, it is likely to cause dermatoses as well as renal, hepatic or neurological failure [8].

To go around this limitation, scientists have implemented processes capable of producing high-quality surface coverings with controlled metal quantities using thermal [9] and cold [10] plasmas. Indeed, the development of such surfaces being in full expansion, the choice of the dry method, in particular plasma spray (PS) and physical vapor deposition (PVD), is based on the ability to control the structure, the microstructure, the texture, composition and consequently, the different properties of the materials. The choice is also based on the feasibility of this type of multifunctional coating on various metallic substrates such as steel, and heat-sensitive ones such as glass, wood or plastic. In addition, through these techniques, some compounds could be added to the initial material in order to improve its antibacterial efficiency or even give it some interesting new properties. Consequently, the purpose of the study is the comparison of the efficacies of an 'antibacterial Cu matrix' doped by a photo-catalytic compound (TiO₂) and a biocompatible and mechanically solid matrix (TiN), doped by antibacterial elements like Cu or Ag. These materials are supposed to be used as surface coverings of daily used tools or objects in public transports (bus, train, plane), medical supplies or pipelines for water distribution. The project consortium is presented in **Appendix 1**.

2. Main objectives

This study sets up three main objectives: **(1)** monitoring the photo-catalytic activity of metal matrix (Cu) materials doped with TiO₂ obtained by plasma spray (PS), **(2)** evaluating the antibacterial efficacy of these coatings before and after doping and that of a PVD-titanium nitride matrix (TiN) doped with Ag and Cu, and **(3)** studying membrane integrity and enzymatic activity of the bacteria in order to understand the mechanism of antimicrobial action.

3. Literature review

According to previous and recent studies, several materials have demonstrated remarkable antimicrobial properties. As mentioned in the introduction, the event that draw the scientific community to the subject was the emergence of the SARS-CoV-2 virus at the end of 2019. Since then, researchers have been developing innovative solutions every day to fight microorganisms. Indeed, these are not limited to viruses but there are also bacteria, algae and fungi. Thus, finding a potential material to combat all or a maximum of microorganisms present on the surfaces at once, is necessary especially for medical utensils and public use. In addition, these materials could be used to coat the inside of pipes, for example to combat micropollutants in water. The common antibacterial materials belong to ceramic families, epoxy resins, and metals such as silver, copper, zinc, gold and platinum [6,11]. Indeed, antibacterial surfaces are effective against a wide variety of bacteria. They often contain active ingredients based on silver or copper, allowing effective sanitation, but they provide more advanced protection by continuously inhibiting the growth of microbes (viruses, bacteria, fungi, algae) for longer durations [11]. Scientists are particularly interested in silver and copper for a variety of reasons explained in the following part.

Silver

This metal, with germicidal and bactericidal properties, was already used in the form of plates since antiquity to purify water, thus providing drinkable water [12]. Along with gold, platinum and palladium, silver is one of the four precious metals. Known since antiquity, its name comes from the Latin *Argentum*, or the Indian Sanskrit *Ar-jun* which means “shining”. Until today, this metal, highly coveted despite the fluctuation of its cost, has always been used in different forms in everyday life. Pure silver is bright white, and has high electrical and thermal conductivities, which constitutes an advantage for the development of plasma coatings as explained by *Boyer et al.* [13]. At bacteria level, reactions on the surface of a silver nanoparticle have the possibility of weakening the membrane of the bacteria leading to its destruction (**Figure 1**).

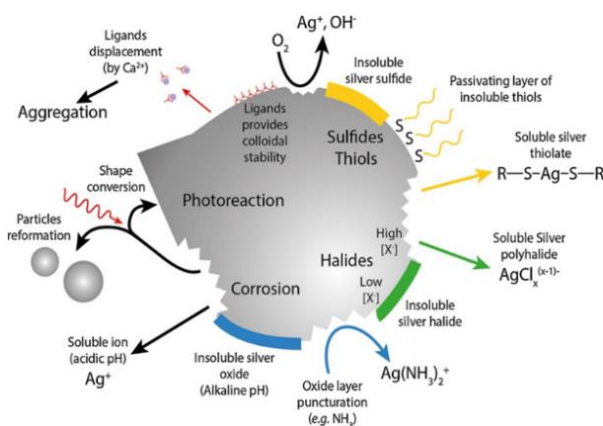


Figure 1: Schematic representation of the main possible reactions on a silver nanoparticle surface [13].

Silver nanoparticles can neutralize the charge of the membrane by adsorption and thus contribute to its weakening. This causes leakage of the cytoplasm (**Figure 1**). Once the membrane is pierced, the nanoparticles can enter the bacteria through the formed pores. These nanoparticles can also enter through ‘porins’, proteins of the bacterial membrane allowing the exchange of ions or hydrophilic molecules [13]. These nanoparticles can also interact with the DNA and condense it, making its replication impossible [13].

Copper

The name of this metal is originated from Latin *Cuprum* which designates ‘the Romans who imported copper from Cyprus’. It is the first metal to be used by man since 5000 B.C. and the third most used metal in the world after iron and aluminum. This era, called the Copper Age, allowed the establishment of metallurgy for decorations, jewelry, tableware, and silverware. Nowadays, this metal, abundant in certain areas of the Earth, appears in various forms. There is gray copper associated with antimony and arsenic, copper sulfide, copper in the form of oxides (cupric ions Cu^{2+} or copper ions Cu^+) and copper in the form of deposits. The first applications of this metal in medicine are mentioned in the book *Smith Papyrus* [3] and it is ideal for developing antibacterial surfaces [14].

Copper’s mechanism of action on microorganisms is still debated in the scientific community. Bacterial death due to copper exposure could be caused by: depolarization of the bacterial membrane, destruction of the bacterial envelope, attack of bacterial DNA, or redox reactions [14]. These different mechanisms of action of Cu on the bacteria are shown schematically in **Figure 2**.

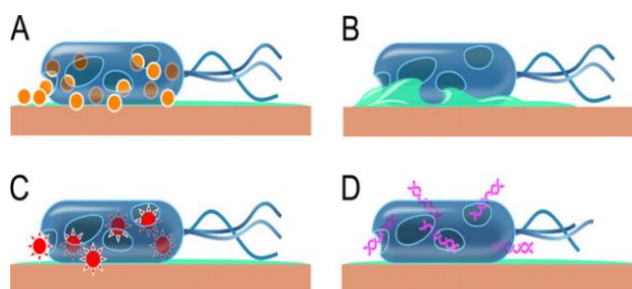


Figure 2: Copper action mechanisms on bacteria via (A) Surface Cu, (B) Cellular lysis, (C) Reactive Oxygen Species (ROS) and (D) DNA destruction [7].

Despite its antibacterial properties, copper becomes toxic if present in large quantities in the human body. It is a trace element essential to life in the sense that it helps in the production of blood hemoglobin, it strengthens the immune system and it participates in the constitution of some proteins [7]. However, in case of absorption of large doses of copper or one of its derivatives, life-threatening intoxication manifested by violent vomiting occurs. In addition, Cu^{2+} ions present in the body can react with thiols (RSH) following the reaction [7]: $2\text{Cu}^{2+} + 2\text{RSH} \rightarrow 2\text{Cu}^+ + \text{RSSR} + 2\text{H}^+$.

The Cu^+ ions thus react with the H^+ ions and the following O_2 : $2\text{Cu}^+ + 2\text{H}^+ + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Cu}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2$ and then with the hydrogen peroxide generated, $\text{Cu}^+ + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Cu}^{2+} + \text{OH}^- + \text{OH}^*$ [7]. In these three reactions, H_2O_2 is generated and causes the formation of hydroxyl OH^* radicals. The presence of these two compounds in large quantities would cause cellular death rather than bacterial death.

Supporting and additive elements

As discussed above, the development of pure silver or copper coating is very expensive or even unnecessary since the main reactions occur on the surface. For this, it is essential to find a matrix that supports antibacterial dopants.

The required properties of such matrices are mechanical strength and resistance to scratches and abrasion. Furthermore, since the antibacterial dopants will be deposited by the PVD process, it would be interesting to find a matrix that can be obtained using the same technique and has the required properties. The nitrides and carbides of transition metals, commonly Ti, Ni, Ta, V, Ag, Pt and Hf, are interesting for their hardness, corrosion resistance, endurance and good mechanical properties [45]. Furthermore, these compounds exhibit a rate of ductility and plastic deformation thanks to their metallic sublattices. Nevertheless, titanium nitride (TiN) represents 90% of the coatings market and its study dates back to the early 1980s [45]. It has exceptional mechanical properties which allows its use on tools as an anti-wear layer, or as a diffusion barrier in integrated circuits. Therefore, this material is very interesting to combine with antibacterial materials with the aim of hardening daily contact surfaces and disinfecting them, simultaneously.

Some compounds could be combined to the antibacterial elements (Ag or Cu) to enhance the oxidation/reduction surface reactions. Titanium dioxide (TiO_2) is one of the best candidates since it could be activated by UV light. In fact, light absorption with sufficient energy causes the transition of an electron from the valence band to the conduction band creating electron-hole pairs. TiO_2 is then no longer insulating but its conductivity is governed by the movement of these electron-hole pairs. Thus, reduction sites are created by the freed electrons, while the holes will constitute sites for oxidation reactions. These surface redox phenomena are very interesting for many applications such as water treatment, self-cleaning glasses, microbiological activity and energy generation [46]. The photocatalytic effect applied to kill bacteria is presented in **Figure 3**.

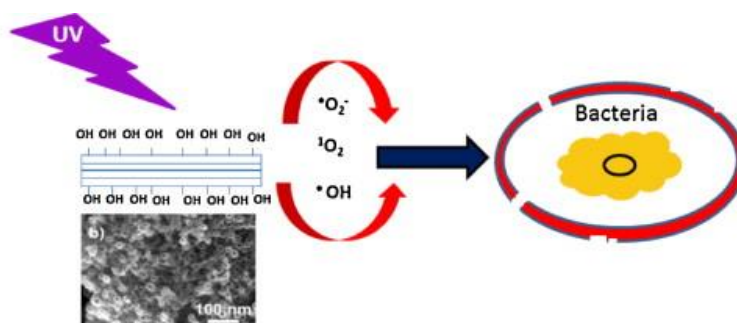


Figure 3: Schematic representation of the bacteria damage by photocatalytic effect [17].

Reactive oxygen species, especially the hydroxyl groups OH^* (**Figure 3**), are very efficient at damaging bacteria membranes, allowing other species to enter the cell, causing its death. Finally, three main TiO_2 polymorphs have been identified in the literature: anatase, rutile and brookite [18]. Brookite is the least studied and has not demonstrated remarkable photocatalytic activity compared to anatase and rutile, mainly due to the high defect concentration in its structure. Meanwhile, rutile and anatase have both a tetragonal symmetry, anatase being the low temperature ($\sim 400^\circ\text{C}$) metastable phase form, as it transforms into rutile when heated up to $650\text{--}700^\circ\text{C}$. Thus, the thermodynamically stable phase is rutile. As a result, TiO_2 has maximum activity in the UV range (355 to 380 nm), corresponding to the gap between the valence and the conduction bands (3-3.2 eV). In photocatalysis, the phase with higher efficiency is anatase. This efficiency is due to a longer lifetime of the electron-hole pairs in this phase since the gap is defined as 'indirect', that is to say additional energy is necessary to bring the electron back to its ground state [16].

4. Main results obtained as part of the RESIST project

The copper based 'metal matrix' coatings ($\text{Cu}:\text{TiO}_2$) were elaborated by plasma spray (PS) on stainless steel substrates (SS). Sandblasting, using *Corindon* (Al_2O_3 , F36 425-600 μm) was performed before the deposition to clean the surface and to enhance coating adherence. The Cu powder is spherical shaped with a nominal particle size distribution $-90+38\ \mu\text{m}$ from *Metco*TM whereas the TiO_2 powder is of Titanium (IV) oxide 99.0-100.5%, AnalaR NORMAPUR® anatase/rutile' from *VMR Chemicals*TM (max. 60 nm particle size). During the plasma spraying process, Cu is supplied in powder whereas TiO_2 is injected in a water-based suspension due its extremely small particle size. The purpose is to conserve the maximum amount of photocatalytic anatase at the surface since the temperature could reach above 10 000 K during the elaboration process. In parallel, titanium nitride coatings (TiN) doped with silver (Ag) and copper (Cu) were elaborated by physical vapor deposition (PVD) technique and supplied by *Oerlikon Balzers*TM, Liechtenstein. The substrates are polished medical grade stainless steel since the growth mechanism in PVD ensures good coating adherence without sandblasting. The photos of the different samples are grouped in **Figure 4**.



Figure 4: Photos of the PVD and PS samples elaborated and tested in this work.

From a macroscopic point of view (**Figure 4**), it could be noticed that the PVD coatings are shinier than the PS coatings which implies different roughness level, in consequence a different wettability by the bacterial solution during the antibacterial tests. Scanning Electron Microscopy (SEM) was then performed on the surface to confirm this observation (**Figure 5**).

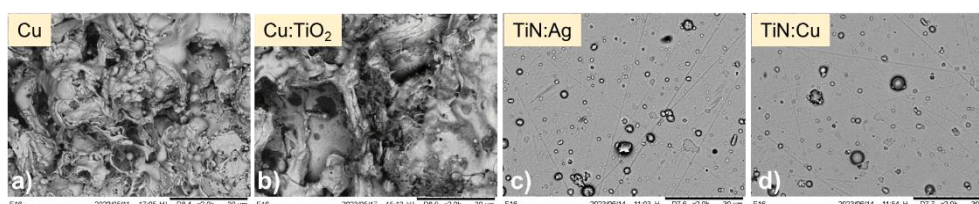


Figure 5: SEM micrographs of (a) Cu/SS, (b) Cu:TiO₂/SS, (c) TiN:Ag/polished SS and (d) TiN:Cu/polished SS.

The macroscopic observation is confirmed in **Figure 5**. Both PS Cu and Cu:TiO₂ (**Figure 5 (a)** and **(b)**) present a rougher aspect compared to the PVD TiN based coatings (**Figure 5 (c)** and **(d)**). This result is logic since the substrate surface state is very different (sandblasted in PS and polished in PVD) according to the process mechanism and requirements. However, in **Figure 5 (c)** and **(d)**, numerous surface dots are visible. X-Ray Dispersive Energy (EDX) confirms that it is neither Ag, nor Cu from doping but more Ti. In fact, droplets are often generated in the cathodic arc PVD process due to local heating of the Ti target. Thus, the Ti droplets originating from this target, pit and develop micro-particles that drop out immediately after the coating process is finished as reported by *Ali et al.* [19].

The mean atomic percentages detected on three-surface points by EDX in the TiN coatings are 6 ± 0.2 at.% and 5.6 ± 0.6 at.% for TiN:Ag and TiN:Cu, respectively. This shows that the PVD coatings are approximatively at the same doping level into the TiN matrix.

As for the Cu:TiO₂ films, EDX shows a Ti/O atomic ratio of 0.53 indicating that the stoichiometric TiO₂ was properly incorporated in the matrix. The results also showed an incorporation up to 16 wt.% of TiO₂ in copper.

As explained previously, TiO₂ anatase polymorph has demonstrated the best photocatalytic activity. However, the challenge in PS is to conserve the maximum amount of this phase because, due to the process high temperature, the incorporated powder will tend to transform into rutile. For this, the X-Ray diffractogram of the Cu:TiO₂ film is presented in **Figure 6**.

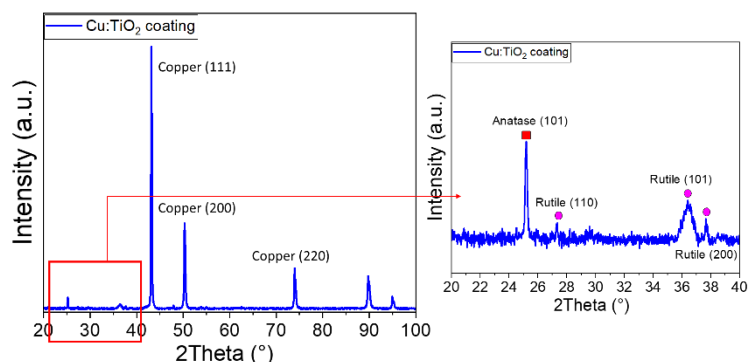


Figure 6: XRD diffractogram of the Cu:TiO₂ coating on SS.

Figure 6 shows that TiO₂ is present in the Cu matrix. It is normal that the relative intensities of TiO₂ peaks are very weak compared to those of Cu, because Cu constitutes approximately 85% of the coating total weight. Despite the process high temperature, the anatase (A) phase is well conserved (peak at 2Theta~25°). The high temperature phase (rutile, R) is also present, which is logic. The anatase fraction could be calculated according to the formula: %A = [8I_A / (8I_A + 13I_R)]*100 [20], I being the peak intensity of anatase (101) and rutile (110). According to the formula, the remaining anatase fraction in the coating reaches 77%, which is not very far from the anatase percentage in the initial powder (~82%). This is probably due to the preparation into a water suspension and the cooling during the plasma process, that does not allow the substrate surface temperature to exceed 360 °C.

As for the antibacterial tests, they were performed at E2Lim laboratory in Limoges. The summary of the main steps is presented in **Figure 7**.

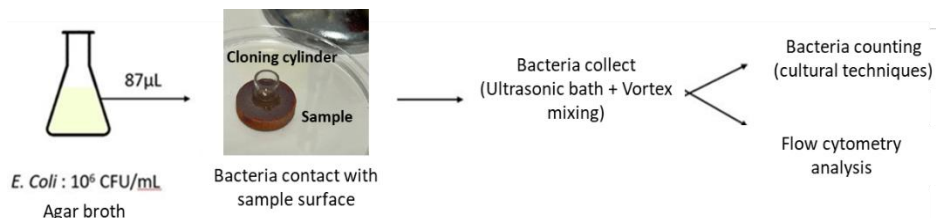


Figure 7: Schematic summary of the main steps in the antibacterial tests performed at E2Lim.

In this study, *Escherichia Coli* is used (CFU=Colony Forming Unit), a Gram-negative bacterium that is surrounded by an outer membrane containing lipopolysaccharide [21]. According to the *Centers for Disease Control and Prevention*, *E. Coli* are able to find new ways to be resistant, even to multiple drugs and most available antibiotics [22]. A volume of 87 μL, containing 10⁶ CFU was deposited on the sample surface then the bacteria were collected using vortex mixing and ultrasonic bath after 1h contact with the surface.

As explained in **Figures 4** and **5**, the surface state of the PS and PVD samples are not the same. Moreover, the sample sizes are different. For this, in order to ensure the same contact surface with bacterial solution, a cloning cylinder have been used according to the recommendation of Oerlikon Balzers based on the ASTM 2180 standard [23].

As presented in **Figure 7**, a part of the bacteria collected from the surface undergoes culture techniques and bacteria counting. By that, the bacteria colonies are counted after contact with the surface as shown in **Figure 8 (a)**.

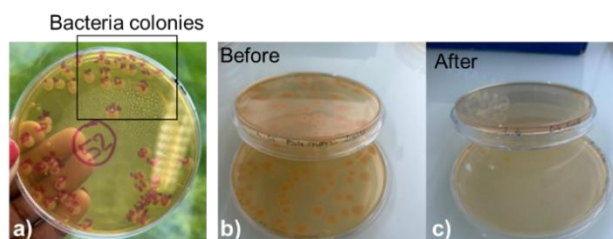


Figure 8: Photos of (a) an example of bacteria colonies obtained using culture techniques, (b) bacteria colonies before contact with a sample, (c) bacteria colonies after contact with Cu/SS surface.

As given in the example of **Figure 8 (b)**, the bacteria initial concentration was around 10^6 CFU.mL⁻¹ before contact (CFU is the unit to estimate the number of viable bacteria on a sample surface). After one-hour exposure to a Cu surface on stainless steel, the concentration drops down to 4.10^2 CFU.mL⁻¹ and on **Figure 8 (c)**, almost no colonies could be observed. By that, a bacterial 'log reduction' could be calculated according to the following formula:

$$\text{Log reduction} = \text{Log}_{10} (\text{initial CFU}/\text{final CFU}) \text{ [24]}$$

For example, 1Log reduction means a 90% (one '9') bacteria elimination, the 'decontamination' threshold is thus fixed at minimum 2Log and the 'disinfection' at minimum 4Log reduction. The bacterial log reduction after 1h contact on the different samples is summarized in **Figure 9**.

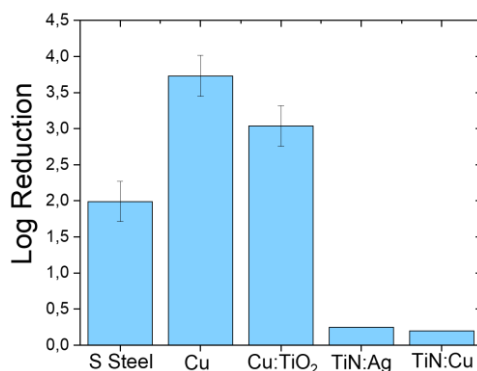


Figure 9: Bacterial log reduction obtained on the different surfaces after 1h exposure.

It can be observed that bacteria elimination is enhanced by around 50% when the stainless-steel surface is covered with Cu. On the latter surface, the log reduction exceeds the decontamination (2Log) thus reaching the disinfection threshold (near 4Log). However, when TiO₂ is added to the matrix (by ~16 wt.% as mentioned previously), the log reduction slightly decreases. It is important to mention that the antibacterial test shown in **Figure 9** is performed without illumination, that may be efficient to activate TiO₂ and enhance bacteria elimination. The detail of the photocatalytic tests will not be given in this article because the results are in progress but a preliminary result showed that the Cu:TiO₂ sample exhibited near 3% degradation of methylene blue after 100 min UV irradiation (365 nm). This percentage is relatively lower than the results with only TiO₂ but it is still explicable by the fact that Cu,

that is not photocatalytic, constitutes the major part of the matrix. In addition, a non-negligible amount of TiO_2 might be incorporated in the Cu bulk instead of being exposed to the light on the surface. Though, the antibacterial test under light irradiation should be performed because 3% degradation is still an indication that redox reactions might help bacteria elimination.

As for the results on the smooth TiN:Ag and TiN:Cu surfaces, bacteria elimination does not exceed 1Log reduction which is very low. However, this does not indicate that these surfaces are not efficient. In fact, the bacteria solution has been only exposed 1h to the PVD coatings whereas the ASTM 2180 standard indicates a minimum exposure time of 24h. Since the TiN based coatings are smoother than the PS coatings, the bacterial degradation kinetics might be slower, so the bacterial solution should be exposed for a longer time. In addition, the protocol should also be adapted according to the sample surface state. In any case, the antibacterial tests on TiN-based samples should be repeated and longer exposure times tested.

Finally, as shown in **Figure 7**, the second part of the collected bacteria was analyzed by Flow Cytometry (CMF). The principle of the technique is detailed in **Appendix 2**. After contact with the coated surface, the cells are marked using two fluorescent substances: Propidium Iodide (PI) and 5(6)-Carboxy-Fluorescein Di-Acetate (CFDA). PI diffuses into damaged membranes and irreversibly intercalates at the level of the cell's DNA, which produces red fluorescence detected by the standard flow cytometer (FL-3 photomultiplier). On the other hand, CFDA serves as a compound that spreads in cell membranes and hydrolyzes by intrinsic esterase activity which leads to green fluorescence measured by CMF using an excitation laser and a photomultiplier (FL-1). An example performed on Cu is presented in **Figure 10**.

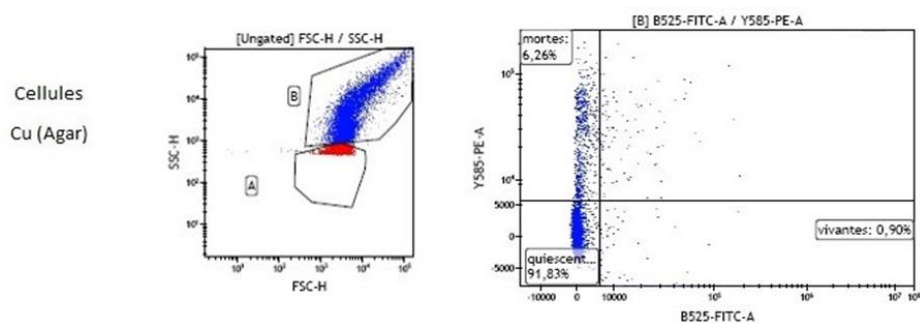


Figure 10: Cytograms obtained by CMF after 1h cell exposure to copper surface.

The results obtained in **Figure 10** show that only 6% of the bacterial population would be positive for PI (red marking), and would therefore be permeabilized, after one hour of contact with copper. This percentage is very low in comparison with the data obtained by culture techniques that show near 4Log after 1h exposure to Cu (**Figure 9**). Additional tests were therefore carried out to ensure that the marking conditions were optimal. The same marking protocol was carried out on untreated cells (control) in a Phosphate Buffered Saline solution (PBS) and in an agar broth identical to that used to deposit the cells on the coatings. It is probable that agar, which is a mixture of two unbranched polysaccharide components, disrupts cell marking by inhibiting the penetration of markers inside the cells and modifies the fluidics of CMF analysis. The results are still under investigation.

5. Conclusion

This work is based on the development of antibacterial coatings using two dry deposition techniques: Plasma Spray (PS) and Physical Vapor Deposition (PVD).

The PS process, carried out at IRCER laboratory, used sandblasted stainless steel on which copper (Cu) has been deposited. In order to evaluate the antibacterial effect enhancement by light, a photosensitive material (TiO_2) is added to the Cu matrix ($\text{Cu}:\text{TiO}_2$). The SEM observations showed a relatively rough surface and the EDX revealed a TiO_2 incorporation up to 16 wt.% into the Cu matrix. However, the preliminary photocatalytic test showed only 3% methylene blue degradation after 100 min irradiation by UV light (365 nm). This low photocatalytic response might be due to the fact that the major percentage of TiO_2 is more incorporated into the copper matrix than exposed to the surface, where the redox reactions should happen. In parallel, TiN-based coatings were deposited by PVD technique on medical grade polished stainless steel and supplied by Oerlikon Balzers. The antibacterial doping agents were Ag and Cu. The SEM images showed a relatively smooth surface with some particles mainly due to the droplet effect of the cathodic arc evaporation process. The TiN matrix has been chosen for its excellent mechanical properties and its biocompatibility. The EDX analysis showed an average doping level of 6 at.% of both Ag and Cu.

The antibacterial tests have been performed at E2Lim laboratory. *Escherichia Coli* (*E. Coli*) has been used as a model to simulate the biological surface contamination. A volume of 87 μL , containing 10^6 CFU was deposited on the sample surface. The bacterial solution deposition took place according to the ASTM 2180 standard recommended by Oerlikon Balzers. In fact, in order to ensure the same contact surface, cloning cylinders were used during the inoculation. The bacteria were collected using vortex mixing and ultrasonic bath after 1h contact with the surface. A part of this bacteria were counted using the cultural technique (bacteria colonies counting). On Cu, the bacterial reduction log reached the disinfection threshold (4Log) whereas on $\text{Cu}:\text{TiO}_2$ the reduction log was near 3Log. Since the sample had not been irradiated, it is logic that $\text{Cu}:\text{TiO}_2$ showed a lower activity than pure Cu since it has less antibacterial agent (Cu). Even though the photodegradation percentage was low, the antibacterial test under UV irradiation on $\text{Cu}:\text{TiO}_2$ sample is still worth the investigation to see if the bacteria elimination efficiency is enhanced compared to pure Cu. As for the bacterial reduction on TiN:Ag and TiN:Cu, the results did not exceed 0.5Log which corresponds to very low efficacy. In fact, the standard recommends 24h exposure time on such surfaces since they are smooth, so the degradation kinetics might be slower than that on rough samples. Moreover, the solution adhesion on smooth surfaces is not similar to that on the rough ones, due to the different surface tension (hydrophilic and hydrophobic character). For this, an investigation of the contact angle is mandatory on each surface state.

Finally, CMF analysis showed that only 6% of the bacterial population would be permeabilized, after one hour of contact with Cu. This percentage is very low compared to the bacterial reduction log obtained by culture techniques. It is probable that agar disrupted cell marking by inhibiting the markers penetration inside the cells and modified the fluidics of CMF analysis. Technical studies are ongoing to validate the photocatalytic tests, repeat the results on TiN-based coatings by the standards, perform antibacterial

tests under illumination and improve the CMF analysis protocol, for surface disinfection and water treatment applications.

6. References

- [1] C. König, 'Bactéries et microbes de tout genre', *Futura-Sciences* (2007).
- [2] S. Lacombe, T.-H. Tran-Thi, C. Guillard, J.-M. Herrmann, V. Keller-Spitzer, N. Keller, M.-T. Maurette, P. Pichat, T. Pigot, C. Pulgarin, A.-G. Rincon, D. Robert, 'La photocatalyse pour l'élimination des polluants', *L'actualité Chimique* **308-309** (mai-juin 2007), p. 79-93.
- [3] H.H.A. Dollwet, J.R.J. Sorenson, 'Historic uses of copper compounds in medicine', *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* **2** (1985), p. 80-87.
- [4] B. Li, Y. Luo, Y. Zheng, X. Liu, L.Tan, S. Wu, 'Two-dimensional Antibacterial Materials', *Progress in Materials Science* **130** (2022), p. 100976.
- [5] F. Pahlevanzadeh, M. Setayeshmehr, H.R. Bakhsheshi-Rad, R. Emadi, M. Kharaziha, S.A. Poursamar, A.F. Ismail, S. Sharif, X. Chen, F. Berto, 'A Review on Antibacterial Biomaterials in Biomedical Applications: From Materials Perspective to Bioinks Design', *Polymers* **14** (2022), p. 2238.
- [6] L. Ye, Z. Cao, X. Liu, Z. Cui, Z. Li, Y. Liang, S. Zhu, S. Wu, 'Noble metal-based nanomaterials as antibacterial agents', *Journal of Alloys and Compounds* **904** (2022), p. 164091.
- [7] G. Grass, C. Rensing, M. Solioz, 'Metallic Copper as an Antimicrobial Surface', *Applied and Environmental Microbiology* **77** (2011), p. 1541-1547.
- [8] N. Hadrupa, A.K. Sharmab, K. Loeschner, 'Toxicity of silver ions, metallic silver, and silver nanoparticle materials after in vivo dermal and mucosal surface exposure: A review', *Regulatory Toxicology and Pharmacology* **98** (2018), p. 257-267.
- [9] Y.-C. Liu, Y.-T. Lee, T.-C. Huang, G.-S. Lin, Y.-W. Chen, B.-S. Lee, K.-L. Tung, 'In Vitro Bioactivity and Antibacterial Activity of Strontium-, Magnesium-, and Zinc-Multidoped Hydroxyapatite Porous Coatings Applied via Atmospheric Plasma Spraying', *ACS Applied Biomaterials* **4** (2021), p. 2523-2533.
- [10] M. Zaborowska, K. Welch, R. Brånemark, P. Khalilpour, H. Engqvist, P. Thomsen, M. Trobos, 'Bacteria-material surface interactions: methodological development for the assessment of implant surface induced antibacterial effects', *Journal of Biomedical Materials Research B: Applied Biomaterials* **103B** (2015), p. 179-187.
- [11] Medd Agencement, 'L'utilisation de surfaces antibactériennes' (February 2021).
- [12] J-C. Bernier, C. Vialle, 'Des métaux qui guérissent ?', *Médiachimie* (2020).
- [13] C. Boyer, 'Le développement des nanoparticules d'argent comme agent antibactérien : quels risques pour la santé et l'environnement ?', *PhD thesis from University of Picardie Jules Verne* (2021).
- [14] A. Fleurentin, 'Le cuivre, ses alliages et les épidémies', *La Jaune et la Rouge* N° 758 (2020).

[15] A. M. Salah, M. Bouhadja, 'Études de revêtements durs à base de carbures et nitrures des métaux de transition en utilisant l'approche Datamining', *Mémoire d'ingénieur de l'Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen* (2009).

[16] L. Youssef, 'Le dioxyde de titane, une céramique semi-conductrice d'avenir', article in *Culture SciencesChimie* (2017).

[17] L.J. Podporska-Carroll, E. Panaitescu, B. Quilty, L. Wang, L. Menon, S.C. Pillai, 'Antimicrobial properties of highly efficient photocatalytic TiO₂ nanotubes', *Applied Catalysis B: Environmental* **176-177** (2017), p. 70-75.

[18] T.R. Esch, I. Gadaczek, T. Bredow, 'Surface structures and thermodynamics of low-index of rutile, brookite and anatase – A comparative DFT study', *Applied Surface Science* **288** (2014), p. 275-287.

[19] M. Ali, E. Hamzah, I.A. Qazi, M.R.M. Toff, 'Effect of cathodic arc PVD parameters on roughness of TiN coating on steel substrate', *Current Applied Physics* **10** (2010), p. 471-474.

[20] N. Berger-Keller, G. Bertrand, C. Filiatre, C. Meunier, C. Coddet, 'Microstructure of plasma-sprayed titania coatings deposited from spray-dried powder', *Surface and Coatings Technology* **168** (2003), p. 281-290.

[21] T.J. Silhavy, D. Kahne, S. Walker, 'The Bacterial Cell Envelope', *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology* **2** (2010), p. a000414.

[22] Centers for Disease Control and Prevention, 'Gram-negative Bacteria Infections in Healthcare Settings', page last reviewed on January 2011.

[23] ASTM E2180-18 'Méthode d'essai standard pour déterminer l'efficacité des substances antimicrobiennes dans les matériaux polymères ou hydrophobes'.

[24] L. Smith, J.E. Mann, K. Harris, M.F. Miller, M.M. Brashears, 'Reduction of Escherichia coli O157:H7 and Salmonella in Ground Beef Using Lactic Acid Bacteria and the Impact on Sensory Properties', *Journal of Food Protection* **68** (2005), p. 1587-1592.

[25] A. Crinier, Flow Cytometry (2015) <https://tice.agrocampus-ouest.fr>.

Appendix 1

Consortium composition

This project involves various complementary skills to obtain coherent and usable results. This interdisciplinarity is supported by a consortium of two academic establishments and an industrial who have put their efforts into proposing a project entitled 'RevêtEmentS antImicrobienS méTaux' (RESIST), submitted as part of the Call for Exploratory Projects in 2022. This project has been accepted for 12-month funding by the University of Limoges to develop an 'antibacterial surface treatment'.

As for the members of the consortium, the 'materials and plasma' skills are provided by the *Institut de la Recherche sur les Céramiques* (IRCER), Joint Research Unit of the National Center for Scientific Research (UMR, CNRS 7315). This research institute, part of the University of Limoges, brings together

around 100 permanent staff specializing in ceramic shaping and surface treatment processes for aeronautics, automobiles, environment, energy and biomedical devices.

On the other hand, microbiology skills are provided by Eau et Environnement de Limoges (E2lim), Research Unit (UR 24133) of the University of Limoges bringing together 35 permanent staff specialized in various disciplines of water and environmental sciences such as chemistry, biology, microbiology, soil sciences and process engineering.

This study is carried out in strong collaboration with two technical and technological platforms: CARMALIM, specialized in the characterization of materials and BISCEm for integrative biology, health, chemistry and the environment. Some experiments took place at the National School of Engineers of Limoges (ENSIL-ENSCI).

The consortium also includes an industrial partner, Oerlikon Balzers, a global supplier of surface technologies improving the durability and performance of precision components as well as tools for the metal and plastics industry. The best-known ranges of thin and hard deposits are BALINIT™ and BALIQ™, used on parts subject to high mechanical and thermal stress. Worldwide, the Balzers group has 1300 deposition systems, with the design and assembly lines of the machines being carried out in Liechtenstein and Germany. The project is in partnership for PVD deposits as well as certain microbiology expertise with the Balzers sites in Liechtenstein and Limoges in France, two of the 35 sites scattered across Europe, Asia and the Americas.

Acknowledgments

We thank all the IRCER and E2Lim staff who helped us and Laurène Gnodé (the internship student) during this work. We cite Geoffroy Rivaud and Quentin Dubreuil for technical support at the technological hall in IRCER, Catherine Ouk for Flow Cytometry analysis, Christelle Dublanche-Tixier, Pascal Tristant and Christophe Le Niniven from Materials department and Geneviève Feuillade, Patrick Leprat from Eau et Environnement department at ENSIL-ENSCI for facilitating the access to the practical works and the UV-Visible analysis. We do not forget to thank Mickaël Lacroix and Anne Aimable for the suspension analysis. Thank you, Philippe Thomas and Gilles Guibaud, for receiving Laurène Gnodé in IRCER and E2Lim, respectively.

Appendix 2

Flow Cytometry (CMF)

Discovered in the 1980s to detect anomalies in animal cells, the cell cycle in particular, this method is nowadays widely used in microbiology.

Flow Cytometry (CMF) is based on an analysis of isolated cells driven by a liquid flow. It is a relatively powerful technique due to its speed (around 1000 events per second), its precision and its analysis sensitivity. The cells, prepared in suspension, pass, one by one, in a liquid sheath crossed by a laser beam (Figure 11).

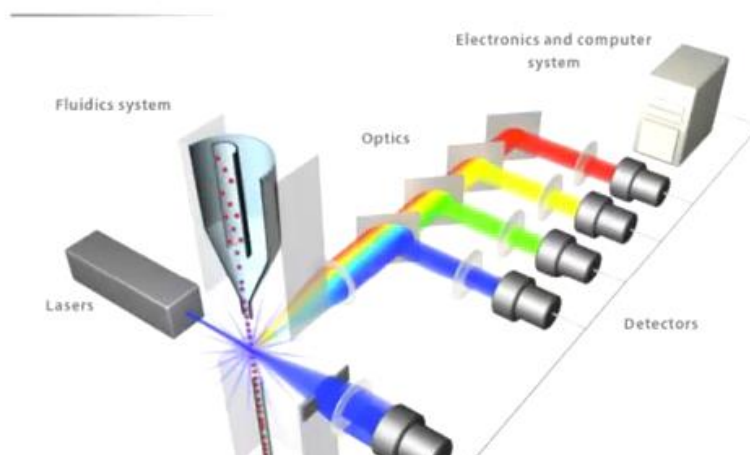


Figure 11: Schematic representation of the Flow Cytometry (CMF) principle [25].

The cells then emit light information, separated by an optical network and directed towards photomultipliers which amplify this information and transform it into electronic signals.

Several parameters can be considered simultaneously. There are the parameters of light diffusion by the cells in the Forward Scatter axis (dispersion at 180° , FSC) or at right angle Side Scatter (dispersion at 90° , SSC) which are function of the morphological characteristics of the strain analyzed. There are also the fluorescence parameters via the use of fluorochromes specific to a cellular structure or function. The light signals emitted by cells (fluorescence or diffusion) are processed and quantified in the form of arbitrary units proportional to the activity of the function studied or the importance of the structural parameter explored. The analyzes are carried out at the technological platform of the University of Limoges (BISCEm, UMS Inserm 042, CNRS 2015).

The device used is the Cytoflex LX[®] cytometer (Beckman Coulter[®]) equipped with an argon laser (488 nm) having a power of 50 mW. The 488 nm corresponds to the excitation wavelength of the fluorochromes used (IP and CFDA).

The green fluorescence emitted by the bacteria which have hydrolyzed the CFDA is collected using a 530 (± 30) nm bandpass filter. The red fluorescence, emitted by the bacteria labeled with the PI, is collected using a 610 (± 30) nm high-pass filter.



**Les journées de
l'interdisciplinarité**

Remettre le citoyen au cœur de la diffusion scientifique : Présentation et évaluation du projet « LIRES₂-Donne ta langue au chercheur »

Putting citizens back at the heart of science dissemination: Presentation and evaluation of the “LIRES₂-Give your tongue to the researcher” project

Julie Lairesse

Université de Limoges
Julie.lairesse@unilim.fr

Marie Donéda

Récréasciences
m.doneda@recreasciences.com

URL : <https://www.unilim.fr/journees-interdisciplinarite/795>

DOI : 10.25965/lji.795

Licence : CC BY-NC-SA 4.0 International

Résumé : Afin de renouer les liens entre grand public et monde scientifique, le Ministère de l'Enseignement et la Recherche a créé un label nommé SAPS (Sciences Avec et Pour la Société). Cet article propose de présenter et d'évaluer un projet mis en place au sein de l'Université de Limoges et du CCSTI Récréasciences en réponse à cette problématique. Il est également proposé de présenter les critères d'autoévaluation utilisés pour ajuster le projet au fur et à mesure de son avancée afin d'accroître son efficacité et sa réceptivité auprès du public et des scientifiques impliqués. Ce projet s'inscrit dans une démarche basée sur l'hétérogénéité, autant en termes de diversité des publics visés, que de pluridisciplinarité des domaines scientifiques impliqués dans les conseils scientifiques visant à apporter une rigueur scientifique à la démarche tout en maintenant un niveau de partage accessible au plus grand nombre.

Mots clés : diffusion scientifique, citoyen, chercheur, évaluation

Abstract: In order to renew the links between the general public and the world of science, the Ministry of Education and Research has created a label called SAPS (Sciences Avec et Pour la Société). This article presents and assesses a project set up at the University of Limoges and the CCSTI Récréasciences in response to this issue. It is also proposed to present the self-assessment criteria used to adjust the project as it progresses in order to increase its efficiency and receptiveness to the public and the scientists involved. This project is part of an approach based on heterogeneity, both in terms of the diversity of the target audiences and the multi-disciplinary nature of the scientific fields involved in the scientific councils, with the aim of bringing scientific rigour to the approach while maintaining a level of sharing accessible to as many people as possible.

Keywords: scientific dissemination, citizens, researchers, evaluation

Introduction

Dans l'objectif de lutter contre la défiance du grand public vis-à-vis de la science et donc de renouer les liens entre celui-ci et le monde scientifique, le Ministère de l'Enseignement et de la Recherche a proposé le label SAPS (Sciences Avec et Pour la Société). Cet article vise à présenter et évaluer un projet initié entre l'Université de Limoges et le CCSTI Récréasciences en réponse à ce défi. L'objectif principal est de présenter la stratégie et l'approche adoptées, ainsi que les critères d'autoévaluation utilisés pour ajuster progressivement le projet et améliorer son efficacité et sa réceptivité auprès du public et des scientifiques impliqués. Ce projet s'inscrit dans une démarche fondée sur l'hétérogénéité, à la fois en termes de diversité des publics ciblés et de pluridisciplinarité des domaines scientifiques impliqués.

Pour présenter ce projet nous commencerons par présenter le constat initial, fondement de ce projet puis nous présenterons le fonctionnement du label octroyé par le Ministère de l'Enseignement et de la Recherche, ensuite nous présenterons le projet, puis nous ferons un point sur le retour d'expérience que nous en tirons et enfin nous concluons.

1. Constat

Le constat initiateur de ce projet est celui tiré par la loi Programmation Recherche de 2021¹. En effet, l'enjeu alors décrit pour Science Avec et Pour la Société est le suivant² :

« renouer le pacte entre les chercheurs et les citoyens, en insufflant dans leurs relations plus de familiarité, de confiance et de réciprocité. »

La LPR ambitionne alors de répondre à des enjeux sociétaux qu'elle définit comme prioritaire.

2. Label

Le label SAPS « Sciences avec et pour la société » s'inscrit dans le cadre de la stratégie ministérielle du même nom. Le label, délivré par le MESR, s'adresse aux établissements répondant à 4 critères bien définies³ :

- Un engagement stratégique porté par l'équipe de gouvernance du site
- Une diversité d'action et un socle commun répondant ainsi à 4 axes :
 - Axe 1 - Valorisation de la recherche et de ses enjeux auprès de tous les publics et notamment auprès des scolaires
 - Axe 2 - Formation à la médiation, la communication et à la démarche scientifiques
 - Axe 3 - Valorisation de l'actualité et de l'expertise scientifique dans les médias

¹ Loi de programmation de la recherche pour les années 2021 à 2030, <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/loi-de-programmation-de-la-recherche-pour-les-annees-2021-2030-49733>, consulté le 26 juin 2023.

² Science avec et pour la société : les mesures issues de la LPR, <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/science-avec-et-pour-la-societe-les-mesures-issues-de-la-lpr-49218>, consulté le 24 avril 2023.

³ Critères du label « Science avec et pour la société » (SAPS), <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/criteres-du-label-science-avec-et-pour-la-societe-saps-49490>, consulté le 24 avril 2023.

- Axe 4 - Participation citoyenne à la recherche.
 - Un partenariat fort avec les professionnels du territoire
 - Une auto-évaluation

Le label est ainsi attribué pour 3 ans mais la dotation est annualisée et reconduite en fonction de l'autoévaluation.

Le projet LIRE₂ regroupe ainsi un ensemble de projets répondant à chacun des axes du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Ici, le projet qui nous intéresse est le projet LIRE₂-Donne ta langue au chercheur qui s'inscrit dans l'axe 4 : participation citoyenne à la recherche. En effet, celui-ci a pour objectif d'impliquer, ou plutôt de mettre le chercheur au service du citoyen. Dans cette configuration, c'est le citoyen qui pose ses questions, qui définit ce qu'il a envie de savoir. Les chercheurs et experts issus du monde socio-économique du territoire offrent alors des réponses claires, sourcées et validées par le conseil scientifique.

3. Projet LIRE₂

3.1. Genèse et historique du projet

En 2020, Récréasciences, Centre de Culture Scientifique Technique et Industrielle du territoire Limousin a officialisé et affirmé son partenariat avec l'Université de Limoges par une convention portant la promotion diffusion de la culture scientifique technique et industrielle. Les grands axes du partenariat entre les deux entités s'articulent autour de 4 grands axes :

- L'accompagnement de projets à destination de la communauté éducative et socio-culturelle (ateliers et expositions scientifiques, événements d'envergure, Scientibus),
- La valorisation de la recherche (au travers de conférences, d'afterwork , de media tels que Curieux ! ou du support du Medialab de l'Université de Limoges...)
- La formation à la médiation scientifique (à destination des étudiants et doctorants pour une implication « future » sur les projets de culture scientifique, technique et industrielle)
- L'ancrage territorial (valorisation des savoirs et savoir-faire de l'ensemble des sites universitaires et filières du territoire Limousin auprès de la communauté éducative, des étudiants et du grand public).

Dans ce contexte favorable, le projet LIRE₂ a été pensé en étroite collaboration entre l'Université de Limoges, producteur de connaissances et Récréasciences » passeur-traducteur » de cette connaissance qui a donnée naissance au projet « Donne Ta Langue Au chercheur ». Dans un souci de démystification des sciences, de rapprocher le scientifique du citoyen et de réinstaurer un dialogue entre le monde de la Recherche et la Société Civile, l'Université et Récréasciences ont mis en place un projet ambitieux de sciences participatives autour de thématiques d'enjeux sociétaux majeurs (environnement, numérique, santé). Les deux partenaires ont pu rassembler une grande communauté d'acteurs autour de ce projet fédérateurs et unir leurs compétences spécifiques pour mener à bien « Donne ta Langue au Chercheur » que ce soit en termes de méthodologie, de gouvernance, de formats, et d'approches des publics.

3.2. Méthodologie

La méthodologie de réalisation de donne ta langue au chercheur est la suivante :

- Étape 1. COSTRAT : le conseil stratégique, composé des partenaires du projet (une trentaine), se réunit pour définir la thématique de la prochaine session de l'événement.
- Étape 2. Appel à participation : Le grand public est invité à poser des questions aux chercheurs et experts. Cela se fait à travers différents canaux tels qu'un site dédié, un mail, un numéro de téléphone, un micro trottoir et des formulaires physiques distribués lors d'événements scientifiques tels que la fête de la science, la Nuit Européenne des chercheurs ou la semaine du cerveau. L'appel à participation est également promu de manière étendue via divers médias tels que la presse écrite, les réseaux sociaux et la radio.
- Étape 3. Catégorisation : Les questions collectées sont regroupées en sous-thématiques, nécessaires à la formation de groupes de travail. Par exemple pour la session environnement nous avons eau, santé, biodiversité et énergie.
- Étape 4. Réunion initiale du conseil scientifique : Chaque groupe de travail reçoit l'ensemble de questions lié à sa sous-thématique et procède à une sélection en fonction de leur domaine d'expertise et de leur capacité à y répondre.
- Étape 5. Deuxième réunion du conseil scientifique : Environ 15 jours plus tard, les experts présentent leurs réponses devant l'ensemble du conseil. Ces réponses sont alors validées et ajustées si nécessaire.
- Étape 6. Soirée de restitution : Les questions sont tirées au sort par le public présent. L'expert concerné monte sur scène et dispose de 2 minutes pour répondre à la question posée. À la fin de cette période, le public est encouragé à poser des questions supplémentaires à l'expert. À la clôture de la soirée, un moment de convivialité permet au public d'interagir de manière informelle avec les experts présents et d'échanger avec eux.
- Étape 7. La diffusion des réponses : Les réponses des experts sont ensuite diffusées via différents canaux tel qu'un site dédié où toutes les réponses sont présentées assorties d'une bibliographie, des livres papiers et des expositions des réponses retravaillées à l'aide de médiateurs scientifiques afin d'être adaptées à un public scolaire.

3.3. Objectifs qualitatifs et quantitatifs

3.3.1. Objectif qualitatif

Notre objectif de départ est de permettre aux citoyens du territoire limousins, c'est à dire des départements de Haute-Vienne, Creuse et Corrèze de pouvoir interroger directement les chercheurs de l'Université de Limoges. Le but est de donner un accès direct aux spécialistes de nombreux domaines scientifiques que compte notre Université. Ainsi, cela donne à l'ensemble des citoyens un accès à une information fiable et vérifiée par le comité scientifique.

L'autre objectif de LIREs2 est de rendre le contenu accessible à tous, et ce à travers différentes valorisations : soirée de restitution grand public avec captation vidéo, ressources scientifiques en ligne, captation vidéo, supports éditoriaux (articles, BD, éditions ...)

3.3.2. Objectif quantitatif

Concernant le nombre de questions, nous souhaitons en recevoir suffisamment pour alimenter une soirée à raison d'environ 2 min par questions + 3 minutes de présentation et échange avec le public soit 5 min, sur une session d'1h30, donc 18 questions. A cela il faut rajouter le fait que certaines questions soient des doublons ou non traitables par nos spécialistes, nous appliquons donc un coefficient de 3 par sécurité, ce qui porte le nombre de questions minimales espérées à 54 questions. Bien évidemment afin d'être représentatif des questions de toute la région ce nombre devrait être bien plus grand puisque la population de ces trois régions est d'environ 729 888 habitants (chiffres 2019). Si nous arrivons à toucher ne serait-ce que 0,5 % de la population cela nous amènerait à près de 3600 questions.

Nos deux premières soirées de restitution se sont formalisées dans une salle avec une jauge à 80 places assises. Nous espérons atteindre un taux de remplissage de 80 % soit 64 personnes.

Nous espérons réussir à traiter à minima une trentaine de questions par session, nous ne souhaitons pas surcharger les chercheurs qui effectuent ce travail sur la base du volontariat.

Nous ambitionnions également de réussir à s'adresser à l'ensemble des 3 départements et pas uniquement cibler la Haute-Vienne dans un souci d'équité territoriale.

4. Retour d'expériences

4.1. Recueil des données et résultats

Afin de recueillir les avis des chercheurs, experts, partenaires et citoyens, nous avons réalisé plusieurs études.

4.1.1. Conseils scientifiques

La première étude réalisée, reposant sur un questionnaire, visait à évaluer les conseils scientifiques et permettait alors de demander leur avis aux experts, anonymement, sur les éléments suivants : Concept général, format de réponse demandé (à savoir 2 min + 1 bibliographie), projet de soirée, clarté des informations qu'ils ont reçu pour mener à bien ce conseil scientifique, documents mis à leur disposition, délai entre 2 séances, quantité de travail demandé, accord pour une prochaine participation, recommandation de l'expérience en tant que membre du conseil scientifique, recommandation de l'expérience en générale, suggestions/observation.

Sur les 2 premières sessions nous avons eu 29 et 35 personnes formant le conseil scientifique, avec entre 77 % et 80 % de chercheurs, les autres membres étant des représentants institutionnels, associatifs, syndicales et entrepreneuriaux.

Nous avons obtenu 12 réponses pour la première session et 21 pour la deuxième.

Les participants des conseils scientifiques ont émis des avis que l'on pourrait qualifier de positif, avec les notes suivantes (Moy : note moyenne, Méd. : note médiane, Bas : note la plus basse, Haut : note la plus haute) :

Quelles notes donneriez-vous aux éléments suivants ? (/10)	Session décembre 2022				Session juin 2022			
	Moy.	Méd.	Bas	Haut	Moy.	Méd.	Bas	Haut
Concept général de LIRE ₂ : demander à la société d'interroger les chercheurs	9.81	10	9	10	9.29	10	6	10
Format de réponse demandé : 2 min d'oral + 1 bibliographie	8.9	9	6	10	7.58	8	4	10
Projet de soirée de réponses	9.29	9	8	10	8	8	5	10
Clarté des explications données pour l'organisation des conseils scientifiques	9.24	9	7	10	8.45	8	7	10
Documents mis à disposition	8.7	9	5	10	8.18	8	5	10

Concernant l'avis sur le délai entre les deux séances du conseil, à savoir 15 jours, il a été jugé adapté sur les deux sessions avec respectivement 75 % et 83 % des réponses. La quantité de travail a également été jugée adaptée avec respectivement 83 % et 100 % de réponses. Concernant l'acceptation pour être sollicité de nouveau pour être membre du conseil scientifique, les réponses étaient oui avec 92 % et 100 % des réponses sur les 2 sessions. Concernant la recommandation de l'expérience d'être membre du conseil scientifique la moyenne est de 8.45 puis 9.11 et la recommandation générale du projet est de 8.75 puis 9.61.

Voici une sélection de quelques avis recueillis :

« [...] Je trouve excellente l'idée de couper les barrières entre les chercheurs.es et le grand public, la crise sanitaire a montré que les gens normaux sont devenus méfiants vis-à-vis du monde de la recherche. » « Très beau projet qui permet de traiter des questions d'actualité et qui favorise la vulgarisation de certains concepts » « Toujours aussi chouette, merci. » « Pas de remarques, c'est top!!! » « LIRE₂ est une excellente initiative, félicitations à ses promoteurs. »

4.1.2. Soirée

La seconde étude visait à recueillir, à l'aide d'un formulaire, les avis des participants à la soirée. Les deux premières soirées ont accueilli 70 spectateurs puis 140 (90 en physique et 50 en live) avec entre 17 et 20

questions tirées au sort par soirée auxquelles s'ajoutent entre 14 et 17 questions supplémentaires posées par le public directement lors de la soirée.

Le formulaire était conçu pour évaluer divers aspects, notamment le profil des répondants (chercheurs, partenaires, citoyen), le moyen de connaissance de la soirée, le concept, le déroulement de la soirée, l'accueil, la thématique abordée, la présentation des réponses, les échanges avec après les réponses, le moment de convivialité, la communication autour du projet. Il demandait également aux participants de signaler s'il avait posé une question lors de l'appel à participation et s'il elle avait obtenu une réponse lors de la soirée. Un espace était dédié aux remarques et suggestions sous un format de réponse plus libre. Le formulaire octroyait également d'obtenir des données statistiques : genre, âge, profession, code postale et si la personne était venue seule ou accompagnée. Le taux de répondants a été respectivement de 8 et 12 % par soirée.

Les participants des soirées de rendus ont émis les avis suivants (Moy : note moyenne, Méd. : note médiane, Bas : note la plus basse, Haut : note la plus haute) :

Quelles notes donneriez-vous aux éléments suivants ? (/10)	Session décembre 2022				Session juin 2022			
	Moy.	Méd.	Bas	Haut	Moy.	Méd.	Bas	Haut
Concept général de LIREs ₂	9.29	9	8	10	9.64	10	7	10
Déroulement général de la soirée	9.29	9	8	10	9.64	10	7	10
Accueil	9.5	9.5	9	10	9.18	10	7	10
Thématique abordée	9.43	9	9	10	9.55	10	8	10
Présentation des réponses	9.29	9	8	10	9.27	10	7	10
Échange après les réponses	9.14	9	8	10	8.91	9	6	10
Moment de convivialité	8.86	9	8	10	9.67	10	9	10
Communication autour du projet	8.43	9	6	10	7.45	9	2	10

Voici une sélection de quelques avis recueillis :

« Belle expérience, rien à dire. Merci » « Poursuivre ces initiatives qui sont vraiment importantes afin que les questions scientifiques sortent des milieux d'expert et fassent débat dans la société » « Des collègues avaient vu l'annonce de l'événement sans donner suite. Lorsque je leur ai parlé ils se sont montrés fort intéressés et ont souhaité les coordonnées du site aussi bien pour les réponses que pour les bibliographies annoncées, notamment les parents pour pouvoir en discuter avec leurs enfants. Finalement j'ai l'impression d'être venue en éclaireur. » « Peut-être communiquer au-delà des cercles

universitaires et des partenaires ; l'événement ne paraissait pas vraiment suivi par les citoyens en général. Présentation et déroulement dans l'ensemble très sympathiques et clairs. » « On ne peut faire mieux ! Si l'on veut que beaucoup de chercheurs interviennent (et c'est nécessaire pour l'intérêt intellectuel), il faut forcément limiter le temps des échanges après chaque réponse et limiter aussi la durée d'intervention de chaque chercheur - moins de 2 minutes ! C'est un exploit de l'esprit de synthèse ! Réussite remarquable, à mon avis. » « Petite salle surchauffée. Cela mériterait un amphithéâtre, avec un peu plus de place ! »

4.2. Pistes d'amélioration

Chaque suggestion a été prise en considération et a engendré des ajustements concrets au sein du projet : des expérimentations ont été menées sur de nouveaux lieux, des modifications ont été apportées dans le déroulement des comités scientifiques, et les canaux de communication ont été élargis. De plus, une attention particulière est portée afin de développer la présence dans les territoires hors agglomération.

Conclusion

La démarche entreprise par le projet LIRES₂, s'inscrivant dans le label SAPS (Sciences Avec et Pour la Société), a été fondamentale pour répondre à l'impératif de renouer les liens entre la communauté scientifique et le grand public. À travers la mise en place d'une stratégie pluridisciplinaire axée sur la participation citoyenne à la recherche, ce projet porté par l'Université de Limoges et le CCSTI Récréasciences s'est déployé avec l'objectif principal d'offrir un accès direct aux chercheurs et experts pour répondre aux interrogations de la société.

Les évaluations et témoignages recueillis reflètent une adhésion et une appréciation conséquentes envers l'initiative. Les participants ont salué l'opportunité de rapprochement entre chercheurs et citoyens, l'accessibilité accrue à des informations scientifiques validées, ainsi que la convivialité des échanges et la qualité des présentations.

À travers ces différentes étapes, le projet LIRES₂-Donne ta langue au chercheur a suivi une démarche d'amélioration continue, intégrant les remarques et suggestions des parties prenantes pour s'adapter et évoluer. Nous avons ainsi élargi nos canaux de diffusion, incluant ainsi des ouvrages et des expositions pour les plus jeunes afin de répondre à une diversification croissante de notre audience. Cette multiplication des canaux et des cibles traduit ainsi l'entrée du projet dans une phase d'essaimage visant à rendre la diffusion scientifique accessible au plus grand nombre.

À la lumière de ces résultats encourageants, il apparaît clairement que le projet LIRES₂ a réussi à atteindre ses objectifs initiaux et à susciter un intérêt notable au sein de la communauté scientifique et du grand public. Cependant, il reste crucial de rester à l'écoute des suggestions des acteurs et participants et de continuer à innover pour garantir un intérêt de la communauté sur le long terme.

Références

Loi de programmation de la recherche pour les années 2021 à 2030, <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/loi-de-programmation-de-la-recherche-pour-les-annees-2021-2030-49733> (consulté le 26 juin 2023).

Science avec et pour la société : les mesures issues de la LPR, <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/science-avec-et-pour-la-societe-les-mesures-issues-de-la-lpr-49218> (consulté le 24 avril 2023).

Critères du label « Science avec et pour la société » (SAPS), <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/criteres-du-label-science-avec-et-pour-la-societe-saps-49490> (consulté le 24 avril 2023).



**Les journées de
l'interdisciplinarité**

Retour vers le perceptron - fabrication d'un neurone synthétique à base de composants électroniques analogiques simples

Back to the perceptron - building a synthetic neuron from simple analog electronic components

Jean-Christophe ORLIANGES

XLIM

Jean-christophe.orlianges@unilim.fr

Younes EL MOUSTAKIME

XLIM

Aurelian CRUNTEANU STANESCU

XLIM

Ricardo CARRIZALES JUAREZ

XLIM

Oihan ALLEGRET

XLIM

URL : <https://www.unilim.fr/journees-interdisciplinarite/761>

DOI : 10.25965/lji.761

Licence : CC BY-NC-SA 4.0 International

Résumé : Les avancées récentes dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA), en particulier dans la reconnaissance d'images et le traitement du langage naturel, ouvrent de nouvelles perspectives qui vont bien au-delà de la recherche académique. L'IA, portée par ces succès populaires, repose sur des algorithmes basés sur des "réseaux de neurones" et elle se nourrit des vastes quantités d'informations accessibles sur Internet, notamment via des ressources telles que l'encyclopédie en ligne Wikipédia, la numérisation de livres et de revues, ainsi que des bibliothèques de photographies. Si l'on en croit les propres dires du programme informatique ChatGPT, son réseau de neurones compte plus de 175 millions de paramètres. Quant à notre cerveau, qui était le modèle initial de cette approche connexionniste, il compte environ 86 milliards de neurones formant un vaste réseau interconnecté... Dans ce travail, nous proposons une approche plus modeste de l'IA en nous contentant de décrire les résultats que l'on peut obtenir avec un seul neurone synthétique isolé, le modèle historique du perceptron (proposé par Frank Rosenblatt dans les années 1950). C'est un "Retour vers le futur" de l'IA qui est entrepris pour fabriquer et tester un neurone artificiel à partir de composants électroniques simples. Celui-ci doit permettre de différencier un chien d'un chat à partir de données anatomiques collectées sur ces animaux.

Mots clés : intelligence artificielle, perceptron, électronique analogique

Abstract: Recent advances in artificial intelligence (AI) in the fields of image recognition and natural language processing are opening up new horizons that extend far beyond the realms of research, to influence our entire society. AI, which is associated with these popular successes, relies on algorithms based on "neural networks" which, using the vast quantities of information accessible via the Internet (information linked to the free encyclopedia Wikipedia, to the digitization of books and magazines, to the libraries of photographs available...), enable these systems to learn automatically. According to the ChatGPT computer program, its neural network contains over 175 million parameters. As for our brain, which was the initial model for this connectionist approach, it comprises some 86 billion neurons forming a vast interconnected network... In this work, we propose a more modest approach to AI, contenting ourselves with describing the results that can be obtained with a single isolated synthetic neuron, the historical perceptron model (proposed by Frank Rosenblatt in the 1950s). It's a "Back to the future" of AI that is undertaken to build and test an artificial neuron from electronic components.

Keywords: artificial intelligence, perceptron, analog electronics

Introduction

Les récents progrès de l'intelligence artificielle (IA) dans les domaines de la reconnaissance d'images, de la traduction de textes et du traitement du langage naturel ouvrent des horizons nouveaux, s'étendant bien au-delà du domaine de la recherche institutionnelle pour exercer une influence sur l'ensemble de notre société. Ces avancées impactent notamment notre façon de communiquer avec les machines, de travailler, de se déplacer, de recevoir des soins médicaux et même de dispenser l'enseignement. L'IA, qui bénéficie du succès croissant de ces réalisations populaires, tire profit d'algorithmes fondés sur des "réseaux de neurones". Ces réseaux exploitent la richesse considérable d'informations offerte par Internet, comprenant des données provenant de sources variées telles que la vaste base de connaissances de Wikipédia, la numérisation de livres et de revues, ainsi que des bibliothèques de photographies... L'apprentissage automatique de ces systèmes repose sur l'utilisation de ces quantités massives d'informations.

Dans cette étude, nous adoptons une démarche plus modeste en matière d'IA, nous nous contentons de décrire les résultats pouvant être obtenus au moyen d'un seul neurone synthétique isolé, en nous inspirant du modèle historique du perceptron, proposé par Frank Rosenblatt dans les années 1950. Une sorte de « Retour vers le futur » de l'IA est entreprise, consistant à concevoir et tester un neurone artificiel en utilisant des composants électroniques analogiques élémentaires. L'objectif de notre perceptron analogique sera de parvenir à distinguer un chien d'un chat à partir de données anatomiques collectées sur des images.

Le travail, présenté ci-après, a été réalisé dans le cadre du stage « Cordée de la recherche » de Younes El Moustakime alors étudiant en Master 1 EUR-IXEO à Limoges.

1. Contexte de l'émergence des réseaux de neurones artificiels

Datant de plus de 60 ans, le concept d'intelligence artificielle fut formalisé à l'initiative de quatre éminents scientifiques : John Mc Carthy, Claude Shannon, Marvin Minski et Nathaniel Rochester (Mc Carthy 1955). Ceux-ci ambitionnaient la réalisation de tâches considérées comme « intelligentes » par des machines de façon plus efficace que l'être humain n'est capable de le faire¹.

La mise en application de ce principe fondateur conduisit au développement de deux approches fondamentalement opposées et rivales : une approche « symbolique » logique totalement conceptualisée et une approche « connexionniste » s'appuyant sur les réseaux de neurones artificiels (RNA) dont le fonctionnement est non explicite, de type « boîte noire » (Larousserie 2018).

L'approche connexionniste, avec ses solutions neuro-inspirées, a suscité beaucoup d'espoir à son lancement mais a rapidement montré ses limites pour les fonctions de reconnaissance et de tri des données (Minsky 1969).

¹ Le terme d'intelligence artificielle est difficile à définir sans ambiguïté, les contours de cette « discipline » étant en constante évolution, ils varient suivant l'efficacité et la nouveauté des solutions algorithmiques proposées (Le Cun 2019).

Le retour en grâce des réseaux de neurones, à la fin des années 80, trouve son origine dans le travail de Yann Le Cun au sein du prestigieux laboratoire américain AT&T Bell (Lecun 1989). Celui-ci entreprend de résoudre le problème de la lecture automatisée des codes postaux apposés sur les colis. En tirant parti des données fournies par l'US Postal Service, il parvient à entraîner un réseau multicouche d'une efficacité remarquable, propulsant ainsi cette approche à une échelle industrielle (Cardon 2018).

Mais ce n'est que depuis 2011, que cette voie de recherche connaît une renaissance éclatante pour le traitement des masses de données avec l'exemple emblématique du triomphe de l'approche connexionniste, portée par une équipe dirigée par Geoffrey Hinton (A Krizhevsky 2012) lors de la conférence ECCV, pour la reconnaissance d'images de la base de données « ImageNet » écrasant les résultats obtenus par les approches « conventionnelles » (Cardon 2018). Le taux d'erreurs de reconnaissance est alors passé de 25 % à 16 % avec ces RNA dits convolutifs.

La figure 1 illustre l'explosion du nombre de paramètres utilisés dans ces algorithmes pour accroître leur capacité d'apprentissage. Le critère retenu dans cette représentation est l'estimation du nombre de neurones modélisés afin de comparer celui-ci au nombre approximatif de neurones dans le système nerveux de divers animaux (allant d'un jusqu'à l'éléphant).

Les premiers algorithmes utilisant des RNA étaient exécutés sur des ordinateurs conventionnels mais l'architecture fondamentalement séquentielle de ces derniers s'avère peu efficace pour implémenter ces réseaux interconnectés et procéder à leur apprentissage, dès lors que leur taille et le nombre de données d'apprentissage augmentent. Parmi ces limites intrinsèques, l'efficacité de ces machines est confrontée au « goulot d'étranglement de Von Neumann », liée à la séparation physique, dans les ordinateurs, de la mémoire et des unités de calcul induisant une latence pour chaque accès mémoire.

Après l'avènement de ces RNA, une recherche très active a alors été initiée pour construire des machines à leur image, d'architecture fondamentalement parallèle, qui seraient à la fois plus efficaces et plus sobres énergétiquement pour effectuer la phase d'apprentissage.

La figure 2 présente une illustration des solutions « hardwares » proposées, en fonction du nombre de neurones accessibles².

² Les algorithmes d'apprentissage profond sont actuellement exécutés grâce à des processeurs graphiques (GPU) plus efficaces pour cette tâche que les microprocesseurs (Lecun 2019)

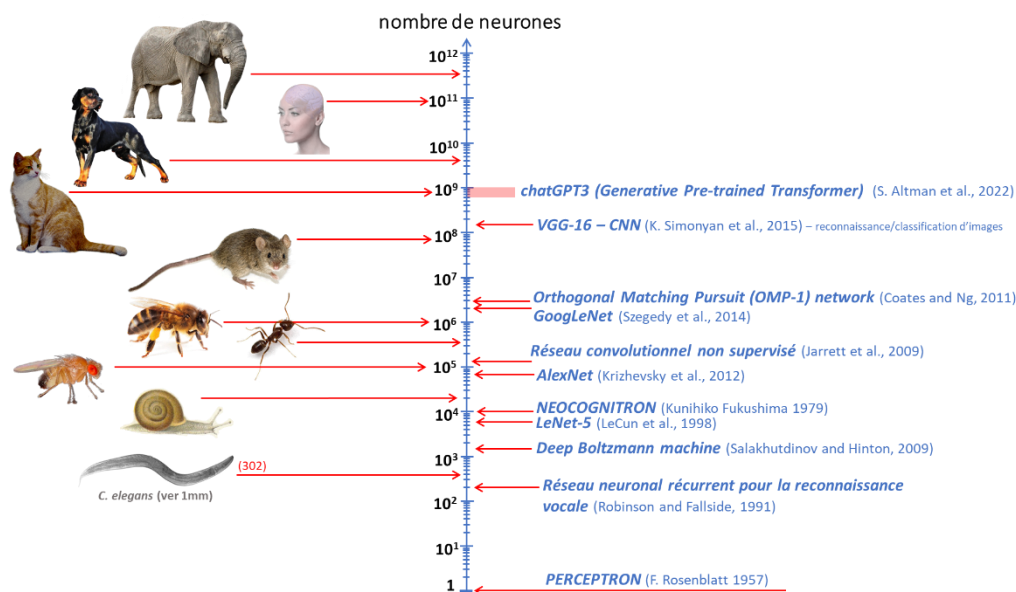


Figure 1 Comparaison du nombre approximatif de neurones dans le système nerveux d'animaux avec le nombre de neurones artificiels utilisés dans différents algorithmes (software) développés depuis les débuts de l'approche « connexionniste » (d'après les données issues de Goodefellow 2016).

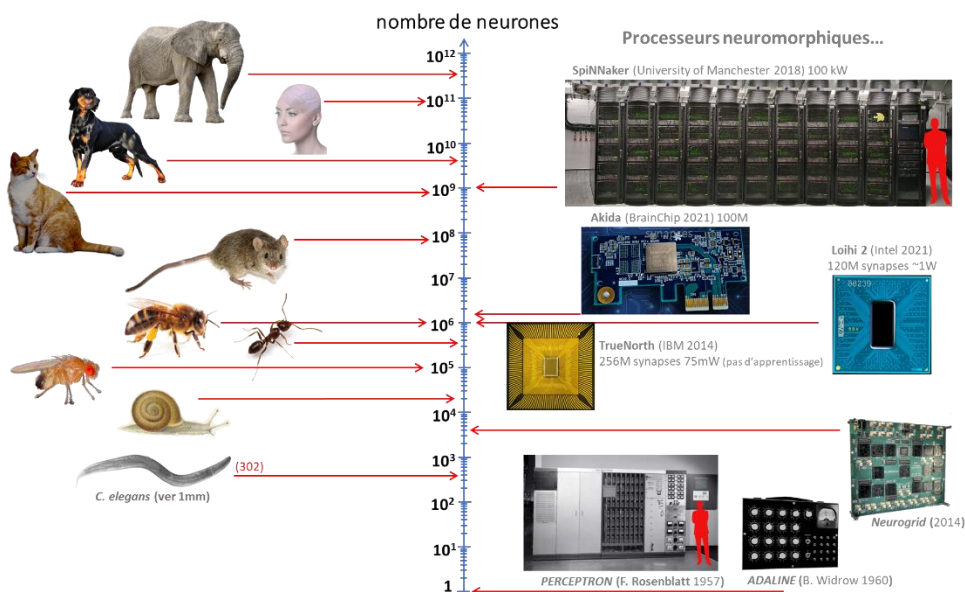


Figure 2 Comparaison du nombre approximatif de neurones dans le système nerveux d'animaux avec le nombre de neurones artificiels dans des dispositifs neuromorphiques physiques (hardware) (d'après les données issues de Wikipedia).

2. Le modèle du perceptron et sa fabrication avec des composants électriques analogiques simples

2.1. Le principe du perceptron

Le perceptron est un modèle (et une machine) créé à la fin des années 1950 par le psychologue américain Frank Rosenblatt de l'Université de Cornell. Il s'appuie sur la compréhension contemporaine des

mécanismes du fonctionnement d'un neurone isolé (figure 3-a) et leur modélisation mathématique proposée quelques années plus tôt par McCulloch et Pitts (McCulloch 1943). Comme illustré sur la figure 3-b, le neurone « mathématique » calcule la somme des signaux amonts (X_1, X_2, X_3, \dots), chacun étant affublé d'un poids spécifique relatif à son importance (W_1, W_2, W_3, \dots). Si la somme de ces activités, une fois pondérées, est inférieure à un certain seuil prédéfini, le neurone reste inactif. En revanche, si cette somme dépasse ce seuil, le neurone s'active (comme illustré sur la figure 3-b).

A ce neurone formel, Rosenblatt ajoute une procédure d'apprentissage à partir de l'estimation de l'erreur commise lors de l'essai ce qui permet l'ajustement des poids synaptiques par correction d'erreur (Rennard 2013).

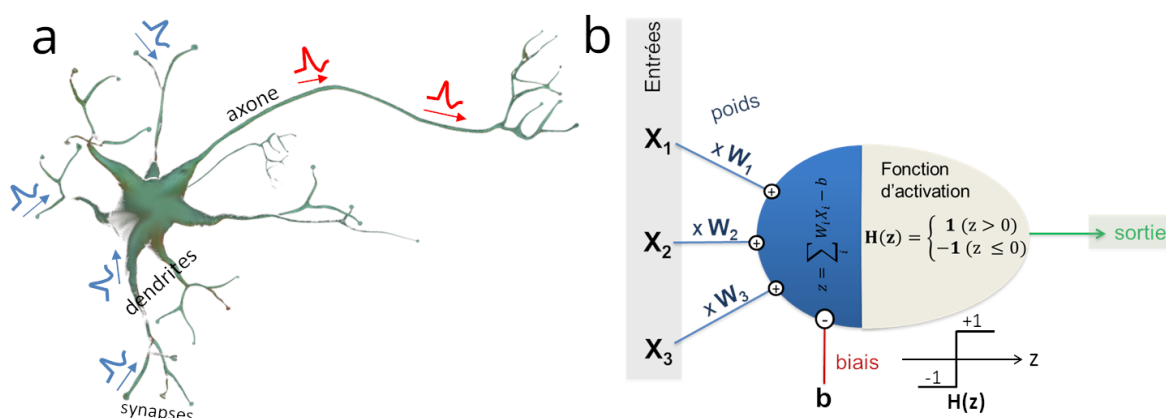


Figure 3 (a) Représentation schématique d'un neurone isolé (b) Shéma de principe d'un perceptron comprenant trois entrées X_1, X_2 et X_3 (soit quatre paramètres : les poids synaptiques W_1, W_2 et W_3 ainsi que le biais b)

Le perceptron a introduit la technique d'apprentissage supervisé en ajustant ses paramètres pour minimiser les erreurs sur un jeu de données dédié. Une fois les poids (W_i) et le biais (b) optimisés, le neurone artificiel devient opérationnel pour sa tâche de classification.

Cependant, la machine apprenante créée par Frank Rosenblatt pour la reconnaissance de formes simples a, malgré les promesses de puissance de son créateur, rapidement révélé ses limites ; elle ne permet de classifier que les données linéairement séparables, ce qui réduit considérablement son champ d'application.

Il faudra attendre l'avènement des réseaux de neurones pour dépasser cette contrainte, ainsi qu'une technique astucieuse pour ajuster en série leurs multiples paramètres (l'algorithme bien connu de la descente de gradient).

2.2. Conception d'un perceptron analogique

Pour réaliser les deux fonctions nécessaires à la fabrication d'un perceptron à partir de composants électroniques simples, il est assez naturel de penser à utiliser un amplificateur opérationnel (AO) en mode additionneur pour la première étape puis, pour la fonction d'activation, il est possible d'utiliser ce même composant en mode comparateur (comme illustré sur la figure 4).

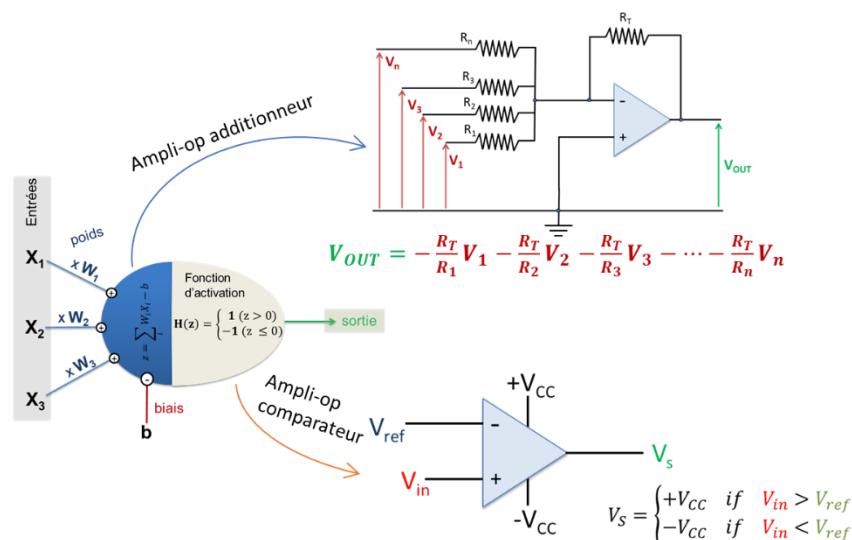


Figure 4 : Conception du perceptron à partir de composants électroniques analogiques simples (résistances ohmiques et amplificateurs opérationnels)

Ainsi, pour la partie additionneur des entrées du perceptron, le poids synaptique appliqué sur chaque entrée sera, au signe près, le rapport $\frac{R_T}{R_i}$. Il suffira donc de modifier les valeurs de ces résistances pour ajuster les poids.

Pour la fonction seuil (fonction d'activation du neurone), si l'on prend la tension $V_{ref} = 0$, donc l'entrée inverseuse de l'AO reliée à la masse, nous obtenons la fonction souhaitée.

Ainsi pour la fabrication de notre perceptron, nous n'utiliserons qu'un jeu de résistances classiques, des potentiomètres (pour ajuster les paramètres à travers la valeur de la résistance) et quelques AO alimentés par des piles 9V.

2.3. Apprentissage du perceptron pour différencier les chiens des chats...

A partir de notre base de données contenant les données morphologiques d'une population de chiens et de chats de races différentes (cf. annexe 1), nous avons choisi deux paramètres sans dimension : les ratios « longueur sur largeur du corps » et « longueur du corps hauteur au garrot » comme illustré sur la figure 5. Le caractère linéairement séparable des données apparaît clairement sur la figure.

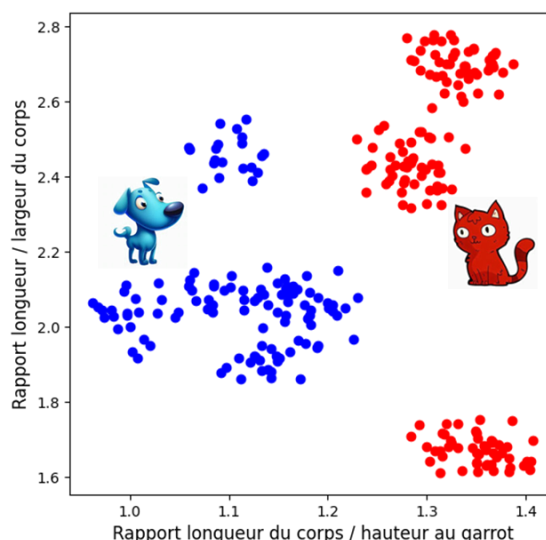


Figure 5 : Répartition des populations de chiens et de chats en fonction des deux paramètres adimensionnels choisis.

Ainsi le perceptron adapté à la résolution de notre problème de classification comporte deux entrées (les couples de valeurs des paramètres morphologiques retenus) et nécessite donc l'optimisation de trois paramètres, deux poids synaptiques (W_1 et W_2) et le biais (b).

Pour réaliser l'apprentissage de notre perceptron, un court programme en langage « python » a été écrit puis exécuté sous la forme d'un « notebook jupyter »³ en travaillant sur une partie des données collectées (données d'apprentissage).

Dans l'algorithme utilisé (présenté en langage python dans l'annexe 2), l'estimation de l'erreur est réalisée en comparant la sortie du perceptron (« -1 » pour un chat et « +1 » pour un chien) avec la réponse connue de l'élément utilisé pendant la phase d'apprentissage. Ainsi de manière élégante, il suffit de s'intéresser au signe du produit de ces deux valeurs pour savoir si la classification chien/chat du perceptron est valable :

$$\begin{array}{ll} \text{entrée} \leftarrow \text{chien} ; \text{perceptron} \rightarrow \text{chien} & \text{entrée} \leftarrow \text{chien} ; \text{perceptron} \rightarrow \text{chat} \\ (+1) \times (+1) > 0 & (+1) \times (-1) < 0 \\ \text{entrée} \leftarrow \text{chat} ; \text{perceptron} \rightarrow \text{chat} & \text{entrée} \leftarrow \text{chat} ; \text{perceptron} \rightarrow \text{chien} \\ (-1) \times (-1) > 0 & (-1) \times (+1) < 0 \end{array}$$

Après la phase d'apprentissage sur l'ensemble des données idoines, nous obtenons les résultats synthétisés sur la figure 6. Avec les paramètres ajustés du perceptron, il est possible de tracer sur le plan de représentation des données la droite de décision (en vert sur la figure 6-b).

³ Le notebook jupyter du perceptron est disponible à l'adresse <https://gitlab.xlim.fr/orlianges/perceptron-analogique.git>

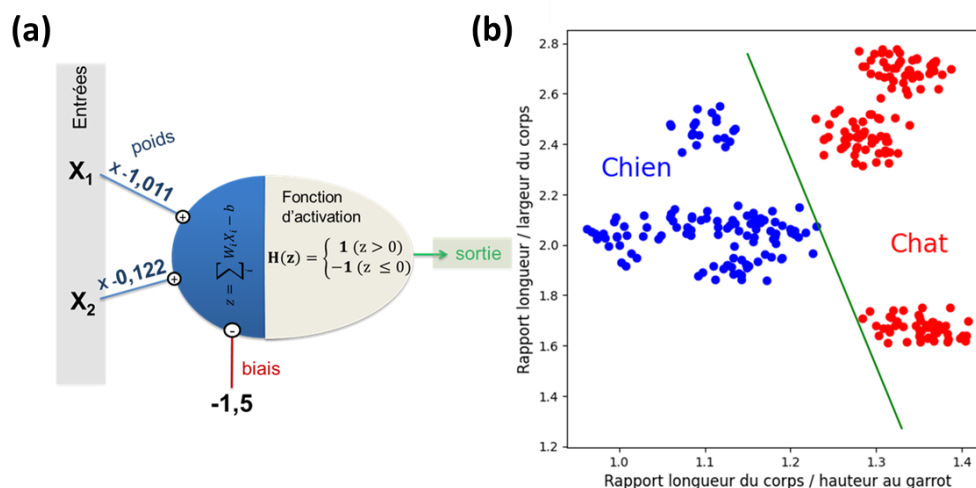


Figure 6-a Schéma du perceptron avec ses paramètres après apprentissage – b Droite de décision associée au perceptron après l'apprentissage, séparant les populations de chiens et de chats dans la même représentation graphique que sur la figure 5.

2.4. Construction et vérification du perceptron « chien / chat »

Connaissant les paramètres du perceptron, il est maintenant possible de choisir et d'ajuster les résistances du circuit à réaliser. Le schéma du circuit est présenté figure 7-a et sa réalisation sur la figure 7-b. Nous avons choisi d'utiliser une résistance $R_a = 10k\Omega$ ainsi les potentiomètres de réglage du perceptron R_1 , R_2 et R_{d2} sont ajustés de façon à obtenir les valeurs suivantes :

$$\frac{R_a}{R_1} = W_1 = 1,011 \Rightarrow R_1 = 9,89k\Omega \quad ; \quad \frac{R_a}{R_2} = W_2 = 0,122 \Rightarrow R_2 = 81,97k\Omega$$

$$\text{et} \quad V_{\text{biais}} = +1,5V$$

Le signal à la sortie du dernier AO du circuit, le comparateur, est positif s'il s'agit d'un chat et négatif dans le cas contraire. Deux LED de couleur respective verte et rouge ont donc été branchées sur la sortie en parallèle et dans des sens opposés pour s'allumer l'une ou l'autre suivant le sens du courant. Lorsqu'aux deux entrées de notre perceptron nous imposons des tensions V_1 et V_2 correspondant aux rapports morphologiques d'un chien, la LED verte s'allume (dans le cas d'un chat, la rouge prend le relais).

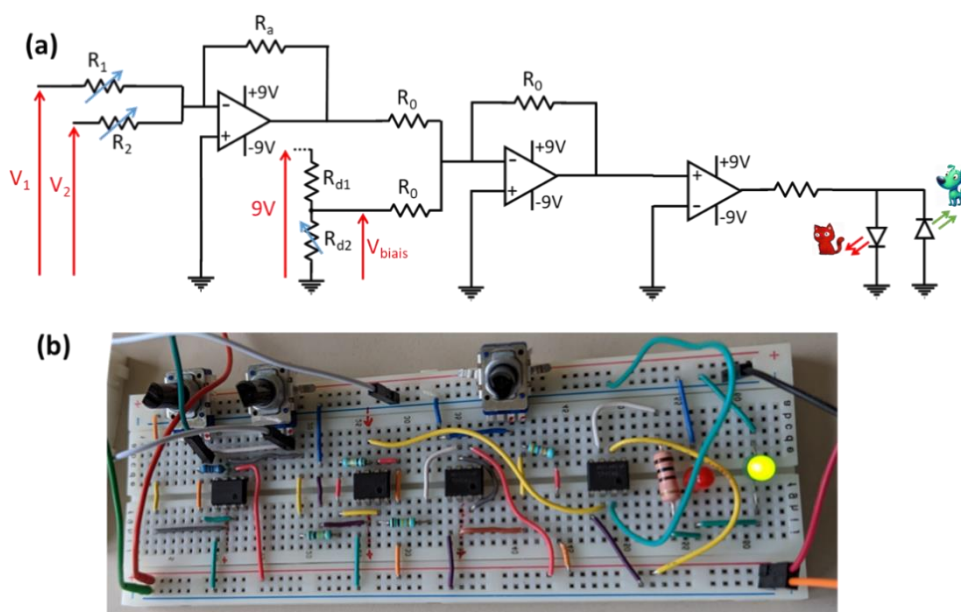


Figure 7-a Scéma du perceptron « chien/chat » - b Circuit réalisé sur une plaque d'étude, alimenté par deux piles de 9V, intégrant des AO, des résistances, des potentiomètres et deux diodes, l'une verte et l'autre rouge.

Après l'apprentissage sur une collection de 270 individus, il a été possible de vérifier la validité des réglages de notre perceptron avec 30 données non encore utilisées sans observer d'erreur.

Conclusion

Dans ce travail d'archéologie scientifique, nous avons pu faire revivre un fossile des début de l'intelligence artificielle, le perceptron monocouche. Nous avons travaillé sur une version analogique rudimentaire de ce dispositif fondateur sur lequel s'appuie encore l'IA moderne avec ses réseaux de neurones profonds comportant des millions d'unités. De même le choix de la nature de la classification de notre perceptron a été inspiré par l'usage historique de ce problème d'identification « chien ou chat », celui-ci étant toutefois directement réalisé sur des bases de données d'images dans ses versions modernes.

L'une des vertus de ce type de travail sur des systèmes physiques simples comme notre perceptron analogique est qu'il permet d'illustrer et de faciliter la compréhension du fonctionnement de systèmes plus complexes ; ainsi, le concept de mémoire sur ce type de dispositif est ici associé au choix et à l'ajustement des différentes valeurs de résistances du circuit (ici la position des différents potentiomètres). Cette mémoire est donc fondamentalement « intriquée » dans ces composants. Dans le cas de réseau de neurones, on appréhende ainsi plus facilement la notion de mémoire associée à un système parallèle distribué.

D'un point de vue pédagogique, ce travail pluridisciplinaire a aussi été conçu pour être proposé à un public de lycéens scientifiques ou techniques en restant assez simple sur la partie électronique analogique et en privilégiant l'usage du langage « python » relativement bien implanté dans ces filières.

Dans les perspectives à ce travail, deux voies de poursuite sont envisagées :

- L'automatisation de l'apprentissage directement sur le perceptron analogique
- La réalisation d'un perceptron multicouche (réseau de perceptrons) ouvrant l'accès à des fonctionnalités plus évoluées

Les auteurs de ce travail remercient le service de diffusion de la culture scientifique, technique et industrielle de l'Université de Limoges ainsi que le personnel administratif de la faculté des sciences et techniques pour le financement de ce travail dans le cadre du projet DEMIA.

Références

CARDON D., COINTET J.-P., MAZIERES A., « La revanche des neurones. L'invention des machines inductives et la controverse de l'intelligence artificielle », *Réseaux*, 2018/5 (n° 211), p. 173, URL : <https://www.cairn.info/revue-reseaux-2018-5-page-173.htm>

GOODFELLOW I., BENGIO Y., et COURVILLE A. (2016) « Deep learning. » MIT press

KRIZHEVSKY A., SUTSKEVER I., HINTON G. (2012), « ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks », NIPS 2012, Lake Tahoe, December 3-6.

LAROUSSERIE D. (2018), « Les cinq saisons de l'intelligence artificielle », *Le Monde*, 18 Juillet 2018.

LECUN Y., BOSER B., DENKER J., HENDERSON D., HOWARD R., HUBBARD W., JACKEL L. (1989) « Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition », *Neural Computation*, vol. 1, n° 4, p. 541

LE CUN Y., BRIZARD C. (2019) « Quand la machine apprend : la révolution des neurones artificiels et de l'apprentissage profond », ODILE JACOB

MINSKY M., PAPERT S. (1969) « An introduction to computational geometry. » Cambridge tiass., HIT, vol. 479, no 480, p. 104.

McCARTY J., MINSKY M.L., ROCHESTER N. and SHANNON C.E. (1955) « A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence », August 31, *AI Magazine*, 27(4), p. 12. doi: 10.1609/aimag.v27i4.1904.

McCULLOCH W.S., PITTS W. (1943) « A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity », *The Bulletin of Mathematical Biophysics* », 5 (4), p. 115.

RENNARD J.-P. (2013) « Réseaux neuronaux – Une introduction », Paris, Vuibert.

ROSENBLATT F. (1958) « The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. » *Psychological review*, vol. 65, no 6, p. 386.

Annexes

Annexe 1 : Construction d'une base de données morphologiques sur les chiens et les chats

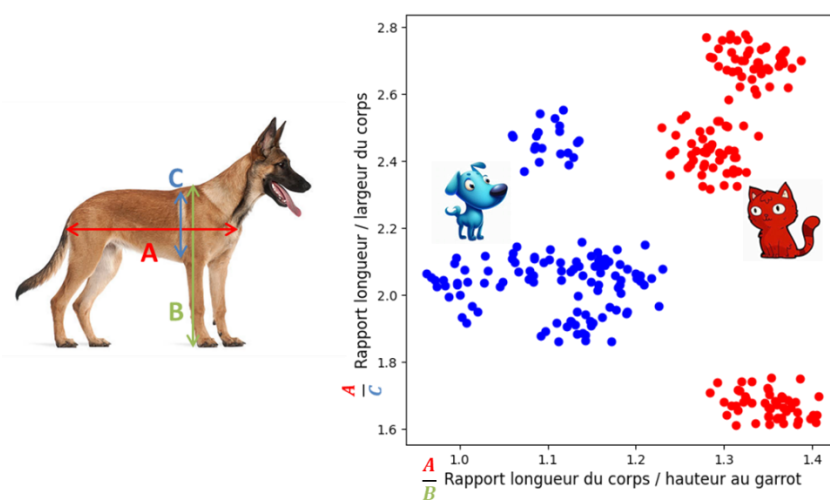
Le web regorge de données concernant les chiens et les chats mais il s'agit principalement de photographies. La capacité de notre perceptron se limitant à quelques paramètres, il nous est impossible de travailler directement avec des images et comme nos recherches ont été infructueuses pour trouver des bases des données numériques concernant la morphologie de ces animaux, nous avons été contraints de créer nos propres données à partir de photographies.

Pour s'affranchir du problème de l'échelle des images récoltées, nous avons choisi d'adimensionner nos données en travaillant sur des rapports de longueurs.

Les races de chien utilisées pour établir notre base de données sont : labrador, doberman, dalmatien, berger allemand, bulldog anglais et chihuahua.

Celles des chats sont les suivantes : siamois, persan, bengal et sacré de Birmanie.

Comme illustré sur la figure ci-après, trois dimensions en pixel ont été relevées sur des images permettant ces mesures : A la longueur du corps, B la hauteur au garrot de l'animal et C la largeur du corps. Comme indiqué dans l'article, le travail sur les ratios A/C et A/B suffit pour obtenir des populations linéairement séparables.



Annexe 2 : Programme du perceptron

Le programme du perceptron donné dans la suite est rédigé dans le langage « python » et a été exécuté dans un notebook jupyter disponible à l'adresse <https://gitlab.xlim.fr/orlianges/perceptron-analogique.git>.

Une première fonction « perceptron » détermine la sortie du perceptron, donc « -1 » pour un chat et « +1 » pour un chien à partir du vecteur d'entrée « X » et de la connaissance des paramètres de celui-ci (vecteur W pour les poids synaptiques et b le biais).

En début du programme poids et biais sont initialisés à la valeur de 0,5.

Comme mentionné dans l'article, c'est le signe du produit « $eti q * activation$ » qui renseigne sur l'erreur commise lors de cette phase d'apprentissage.

Le programme renvoie les paramètres finaux du perceptron lors de son exécution.

```
def perceptron(X, W, b):
    Z = X.dot(W) - b
    return np.where(Z<0, -1, +1)

W = np.array([0.5,0.5]) # initialisation des paramètres
b = 0.5
max_iter = 10
vites_ap = 0.1

for iteration in range(max_iter) :
    test = Data_X[ :,0 :2]
    etiq_test = Data_Etiquette[ :]
    for data, etiq in zip(test, Data_Etiquette) :
        activation = data.dot(W) - b
        if (eti q*activation< =0) :
            W = W + vites_ap*data*eti q
            b - = vites_ap*eti q

W_fin = W
b_fin = b
print("W1 =",W[0]," , W2 =",W[1]," , biais =",b)
```

Il est à noter que le résultat de ce programme n'est pas la valeur optimale des paramètres (qui pourrait être obtenue par une méthode d'ajustement par les moindres carrés par exemple), mais seulement une minimisation « locale » de l'erreur commise lors de l'apprentissage.



**Les journées de
l'interdisciplinarité**

Les programmes d'activité physique en entreprise : la nécessité d'une approche pluridisciplinaire

Workplace physical activity programs: the need for a multidisciplinary approach

Mokhtar ESSAFI

OMIJ, CDES

mokhtar.essafi@etu.unilim.fr

Éric BARGET

CDES

eric.barget@unilim.fr

URL : <https://www.unilim.fr/journees-interdisciplinarite/785>

DOI : 10.25965/lji.785

Licence : CC BY-NC-SA 4.0 International

Résumé : Depuis l'introduction du modèle taylorien de l'Organisation scientifique du travail (OST) à la fin du 19^e siècle, le paysage social des entreprises françaises a connu des mutations profondes. Animé par une ambition de déterminer l'organisation de travail la plus efficace, le « one best way », Taylor a poursuivi son objectif en augmentant la productivité tout en rationalisant le travail (Zarifian, 2011). En retour, cette nouvelle organisation du travail a fortement contribué à la baisse significative du niveau d'activité physique quotidien et à une progression alarmante des comportements sédentaires. De plus, les progrès technologiques et l'avènement de l'ère numérique ont favorisé des conditions de travail de plus en plus exigeantes qui privent les individus d'une dépense physique essentielle au maintien d'une bonne santé physique et mentale. C'est dans ce contexte que les programmes d'activité physique au travail ont émergé, offrant une solution concrète pour contrer les méfaits de la sédentarité et de l'inactivité physique. Cependant, certains obstacles freinent cette dynamique. Cet article vise à réaliser une étude approfondie des enseignements sur les programmes d'activité physique au travail en adoptant une approche pluridisciplinaire.

Mots clés : activité physique, santé au travail, efficacité au travail, milieu professionnel

Abstract: Since the introduction of the Taylorian model of scientific management in the late 19th century, the social landscape of French companies has undergone profound changes. Driven by the ambition to determine the most efficient work organization, the "one best way", Taylor pursued his goal by increasing productivity while rationalizing work. As a result, this new work organization has strongly contributed to a significant decrease in daily physical activity levels and an alarming increase in sedentary behaviors. Furthermore, technological advancements and the advent of the digital era have fostered increasingly demanding work conditions that deprive individuals of essential physical expenditure for maintaining good physical and mental health. It is within this context that workplace physical activity programs have emerged, offering a concrete solution to counter the harmful effects of sedentary behavior and physical inactivity. However, certain obstacles hinder this momentum. This article aims to conduct an in-depth study of the insights on workplace physical activity programs by adopting a multidisciplinary approach.

Keywords: physical activity, workplace health, work efficiency, professional environment

Introduction

Dans les pays industrialisés, la promotion de l'activité physique en milieu professionnel est devenue une préoccupation majeure (Proudfoot Consulting, 2004). En effet, les progrès technologiques et l'avènement de l'ère numérique ont favorisé l'adoption des modes de vie sédentaires, entraînant une diminution significative de la dépense physique quotidienne chez de nombreux travailleurs. Cette absence d'exercice régulier a des conséquences néfastes sur la santé physique et mentale, ainsi que sur la productivité des salariés (BIALÈS Christian, 1997). C'est dans ce contexte que les programmes d'activité physique au travail ont émergé, offrant une solution concrète pour contrer ces effets néfastes.

Pour preuve, nous consacrons près d'un tiers de notre temps au travail. L'activité professionnelle exerce une influence significative sur la santé, ce qui fait de l'entreprise un lieu privilégié pour la mise en œuvre de stratégies et de programmes visant à promouvoir la santé (ENGBERS Luuk, 2009).

La promotion de l'activité physique et la réduction des comportements sédentaires constituent les principaux leviers de la lutte contre les maladies chroniques non transmissibles. Les vertus de l'activité physique, en complément des approches médicamenteuses, préventives ou curatives, présentent une condition essentielle au maintien d'un individu en bon état de santé (BESS Marcus, 2006). Dans cette perspective, le commun de la littérature scientifique sur la santé au travail souligne la nécessité de concevoir de nouvelles stratégies de santé publique afin de lutter à la fois contre la croissance alarmante des comportements sédentaires et la baisse significative du niveau quotidien d'activité physique (BJØRNSKOV Christian, 2017 ; Eurofound, 2016).

En conséquence, il semble aujourd'hui évident que des interventions *in situ* soient nécessaires, tantôt pour augmenter la dépense énergétique quotidienne des employés, tantôt pour limiter la sédentarité au travail (TUDOR-LOCKE Catrine, 2011). La mise en place d'un programme d'activité physique en entreprise favorise la prise de conscience collective des méfaits de la sédentarité tout en motivant et en encourageant les salariés à s'engager dans l'amélioration de leur propre bien-être physique et mental. Ainsi, les entreprises peuvent instaurer une culture du mouvement et contribuer à l'amélioration de la santé et de la productivité de leur facteur humain (PRONK Nicolaas, 2012).

Cependant, certains obstacles tels que le manque de temps et de motivation entravent cette dynamique (HUTCHINSON Amanda, 2012). En effet, les conditions de travail exigeantes et techno-centrées d'une productivité qui ne parvient plus à réduire le temps de travail par individu rendent difficile l'adoption d'un mode de vie actif (PLANCHARD Jo-Hanna, 2018).

Les enjeux que nous venons d'exposer soulignent l'importance de cet article et rendent indispensable une analyse approfondie des enseignements sur les programmes d'activité physique au travail.

I. Les bienfaits de l'activité physique au travail

Depuis l'après-guerre, l'inactivité physique représente sans contredit un risque majeur sur le bon fonctionnement du système cardiovasculaire et locomoteur. Comme en témoigne les recherches menées par Taylor (1949) et Saltin (1968), la mise au lit d'une population de jeunes adultes pendant une période de trois semaines entraîne une baisse significative des capacités cardiaques associée à une augmentation

des résistances vasculaires. Ainsi, l'apparition d'une amyotrophie demeure une conséquence logique lors des alitements prolongés.

D'un autre côté, l'automatisation des chaînes de travail, la robotisation des tâches manuelles, le progrès numérique et l'accroissement des activités de service ont engendré une importante extension du secteur tertiaire au sein de la population active. Cette tertiarisation de l'économie a conduit à une augmentation du temps quotidien dédié aux comportements sédentaires et à l'inactivité physique (BERTHELOT Jean-Michel, 2017).

L'adoption de ce nouveau mode de vie sédentaire n'est pas sans conséquences sur la santé des travailleurs. De plus, avec l'essor du télétravail, cette nouvelle organisation s'est accompagnée par une réduction notable de la dépense énergétique quotidienne, notamment en raison de l'accroissement des moyens de transports passifs au détriment des transports actifs (CLAEYS Frank, 2018).

Un premier survol de la littérature portant sur les méfaits de la sédentarité et l'inactivité physique (American College of Sports Medicine, 2017) explique la dégradation de la santé principalement par une limitation de la consommation maximale d'oxygène et de l'endurance aérobies ; une fréquence cardiaque et une tension artérielle de repos anormalement élevées ; une surcharge pondérale avec un excès de masse grasse ; une diminution de la force et de l'endurance musculaire ; une réduction de la souplesse musculo-tendineuse et de l'amplitude des mouvements articulaires (GARNIER Alain, 1996 ; GALLAGHER David, 2014).

Partant de ce constat, serait-ce utopique d'envisager l'amélioration de la santé et du bien-être au travail dans un contexte social et économique dopé par la rentabilité, la productivité et la montée en puissance des nouvelles technologies ?

En réponse à cette interrogation, différentes institutions, à l'instar de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), considèrent l'entreprise comme « établissement prioritaire de promotion de la santé et du bien-être », et soutiennent la promotion des programmes d'activité physique et sportive sur le lieu de travail (OMS, 2018).

La pratique régulière d'une activité physique est reconnue par la communauté scientifique comme étant un facteur d'amélioration de la santé et de la qualité de vie au travail. Que ce soit en préventif ou en curatif, les recommandations en matière d'activité physique ne cessent de se multiplier. L'activité physique prévient, soigne, soulage, guérit et de solides preuves montrent que les personnes actives ayant une pratique physique régulière sont en meilleure santé que les personnes inactives (ANSES, 2019).

En effet, de nombreuses études scientifiques reconnaissent les bienfaits d'une pratique régulière d'activités physiques sur la santé des adultes. Ces avantages comprennent la prévention et le traitement des maladies cardiovasculaires, tels que l'hypertension artérielle et les pathologies vasculaires cérébrales (DESPRÉ Jean-Pierre, 2012), ainsi que le renforcement de la masse osseuse et la réduction des risques de certains cancers (DALLONGEVILLE Jean, 2023).

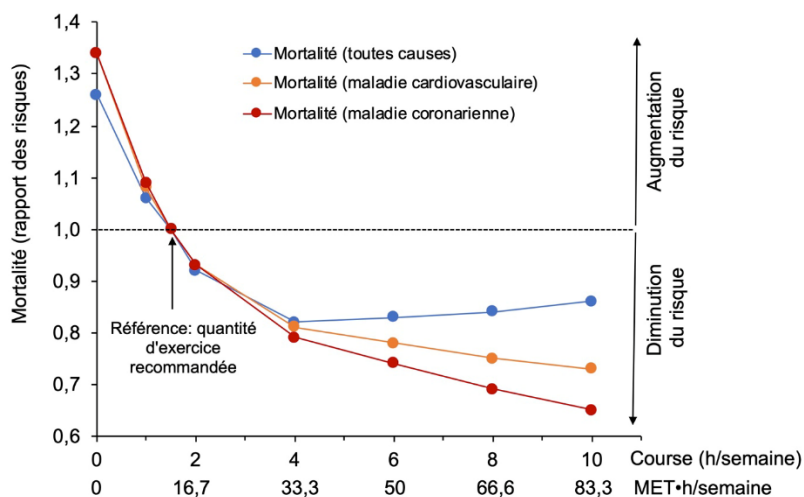
En outre, l'engagement du salarié dans une pratique régulière d'activité physique d'intensité faible à modérée renforce les fonctions immunitaires (GLEESON Michael, 2013). En effet, l'exercice physique a des effets positifs sur la régulation du taux de cholestérol, de la glycémie et de la lipidémie, ainsi que

dans la normalisation de l'indice de masse corporelle (IMC) et de la surcharge graisseuse (CORDER Kirsten, 2020). De plus, l'exercice physique incite les sujets atteints de pathologies coronariennes à arrêter de fumer, élément clé de la prévention secondaire (FLETCHER Gary, 2023). Dans cette perspective, plusieurs études épidémiologiques indiquent que la pratique régulière d'une activité physique adaptée figure parmi les habitudes de vie les plus efficaces pour augmenter l'espérance de vie, et ce jusqu'à six années (DALLONGEVILLE Jean, 2023).

Cette relation dose-effet a fait l'objet d'une revue systématique et d'une méta-analyse publiée en 2019 portant sur 48 études prospectives, dont une comprenant 6 cohortes distinctes et une autre 9 cohortes distinctes (BLOND Kim, 2020). Les chercheurs se sont attachés à l'étude de la relation entre niveaux d'activité physique et risques de mortalité.

Les résultats de l'étude montrent qu'il existe une association inverse entre l'augmentation des niveaux d'activité physique et le risque de mortalité toutes causes confondues, ainsi que le risque de mortalité par maladies cardiovasculaires. Plus précisément, l'étude a montré qu'un niveau d'activité physique supérieur ou égal aux recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (750 minutes d'activité physique modérée ou 375 minutes d'activité physique intense par semaine) était associé à un risque de mortalité toutes causes confondues 14 % inférieur à celui des niveaux d'activité physique en dessous des seuils recommandés. Il existe donc une corrélation entre le niveau d'activité physique et le taux de mortalité (cf. figure 1).

Figure 1 : Relation dose-effet entre la quantité d'exercices physiques et la réduction de la mortalité



Source : Blond (2020, p. 6)

Par ailleurs, l'engagement dans une pratique régulière d'exercices physiques revêt une importance primordiale dans l'amélioration et le maintien d'une condition physique optimale. En effet, les quatre éléments constitutifs de la condition physique, à savoir la composition corporelle, l'aptitude aérobie, la capacité musculaire et la flexibilité, offrent aux travailleurs la possibilité d'exécuter leurs tâches et missions professionnelles avec aisance et dynamisme (DESPRÉ Jean-Pierre, 2012).

Ainsi, des niveaux de composition corporelle non optimaux, notamment le surpoids abdominal, représentent un facteur de risque pour le diabète de type 2 et les affections cardiovasculaires (PRATT

Michael, 2006). Dans cette perspective, l'activité physique régulière présente un potentiel considérable d'amélioration de la composition corporelle. D'autre part, une capacité aérobie déficiente, souvent associée à un faible niveau d'activité physique, constitue un facteur de mortalité prématurée (KATZMARZYK Peter, 2009). En développant leur capacité musculaire, notamment leur force, leur endurance et leur puissance, les travailleurs favorisent la croissance de leur masse musculaire, réduisent les risques de blessures et maintiennent un poids optimal.

Enfin, l'exercice physique régulier, tels que les étirements, augmente la flexibilité et la force des muscles. Cela permet d'améliorer la mobilité articulaire, d'augmenter l'amplitude des mouvements et de réduire le risque de blessures musculaires (American College of Sports Medicine, 2017).

En définitive, il convient de souligner les bienfaits multiples de l'activité physique sur le sommeil des travailleurs. L'activité physique est largement reconnue comme un moyen efficace de favoriser un meilleur sommeil. Plusieurs études ont démontré l'impact positif de l'exercice régulier sur la qualité du sommeil, en particulier chez les salariés sédentaires du secteur tertiaire. Ces bienfaits sont synthétisés en trois points.

Premièrement, l'exercice physique augmente la production de sérotonine, un neurotransmetteur qui favorise la détente et la relaxation. Cette sécrétion joue un rôle clé dans la régulation de l'humeur et du sommeil. Une étude réalisée par Kredlow et al. (2015) a montré que l'activité physique régulière réduisait les symptômes de l'insomnie et améliorait la qualité du sommeil (KREDLOW Alexandra, 2015).

Deuxièmement, l'exercice régulier aide à réduire le stress et l'anxiété, deux facteurs majeurs susceptibles de perturber le sommeil. En effet, la pratique d'une activité physique même à faible intensité favorise la libération des endorphines. Une fois libérées, les endorphines procurent une sensation de bien-être, avec des effets perceptibles jusqu'à 6 heures après l'effort physique (STULTS-KOLEHMAINEN Matthew, 2014). Par conséquent, les sujets régulièrement actifs sont moins sujets au stress comparativement aux sujets sédentaires et peu actifs.

Troisièmement, l'exercice physique régulier favorise la régulation du cycle circadien, qui est essentiel pour un sommeil de qualité. En effet, le rythme circadien contrôle les paramètres de certains processus physiologiques tels que le cycle veille-sommeil, la température corporelle, la sécrétion de cortisol, etc. (DE SAINT-HILAIRE Zara, 2006)

La pratique régulière d'une activité physique d'intensité faible à modérée semble favoriser l'équilibre des rythmes circadiens et l'amélioration de la qualité du sommeil (BARON Kelly, 2013 ; BIALÈS Christian, 1997).

D'après les travaux de François Duforez et Damien Léger (2008) « le rythme veille-sommeil et l'exercice physique sont étroitement liés et toute modification de l'un va modifier le niveau de l'autre. » (DUFUREZ François, 2008)

Outre les bienfaits somatiques de l'activité physique largement documentées par la littérature scientifique, il est important de se pencher sur les effets positifs de celle-ci sur la santé mentale. Plusieurs études récentes ont souligné son impact positif, notamment dans un contexte professionnel.

Selon une revue systématique récente publiée en 2023 par des chercheurs de l'Université d'Australie-Méridionale, la pratique d'une activité physique régulière au travail est associée à une réduction significative des symptômes de stress, de l'anxiété et de la dépression chez les employés (SINGH Manpreet, 2023). En stimulant la libération d'endorphines, également connues sous le nom d'hormones du bonheur, l'activité physique contribue à améliorer l'humeur globale et à réduire les niveaux de détresse psychologique.

De plus, une étude menée par Johnson et coll. (2020) a révélé que les programmes d'activité physique au travail étaient liés à une augmentation de la résilience mentale chez les travailleurs (JOHNSON Jennifer, 2020). En renforçant la capacité à faire face aux défis et aux pressions professionnelles, l'activité physique améliore les fonctions cognitives, ce qui peut améliorer la productivité et la satisfaction au travail.

Il convient également de mentionner une étude récente de Brown et al. (2022) qui a démontré que l'activité physique au travail peut contribuer à réduire les niveaux de fatigue mentale et à limiter la somnolence au travail (BROWN Denver, 2022). En favorisant la récupération physique et mentale des travailleurs, l'exercice physique régulier permet de prévenir l'épuisement professionnel et de maintenir une plus grande clarté d'esprit tout au long de la journée.

En somme, les preuves scientifiques soutiennent la relation positive entre l'activité physique au travail et la santé mentale des employés. Les dispositifs d'APS en entreprise offrent une opportunité précieuse de favoriser le bien-être mental en réduisant le stress, en augmentant la résilience et en limitant les symptômes du présentéisme tels que la baisse de la concentration et la procrastination.

II. Les bienfaits de la promotion de la pratique d'activités physiques pour l'organisation

Les avantages d'un programme d'activité physique en milieu professionnel peuvent paraître évidents, mais ils sont surtout démontrés et quantifiés par de nombreuses études scientifiques. En plus de contribuer à la santé physique et mentale, à la cohésion et à la motivation des équipes et à leur bien-être professionnel, l'activité physique sur le lieu de travail constitue un véritable levier de performance et d'efficacité au travail à faible coût et à fort retour sur investissement.

La promotion d'un programme d'activité physique au travail peut avoir un impact significatif sur la performance de l'entreprise. Une caractéristique commune des programmes de santé et de bien-être qui ont eu un impact positif, tant sur les employés que sur l'organisation, est la présence d'une culture organisationnelle qui favorise le bien-être et la santé au travail. Cela signifie que les valeurs et les comportements partagés par la plupart des employés influencent le fonctionnement de l'entreprise. Par exemple, les entreprises qui inscrivent l'activité physique dans leur culture organisationnelle adoptent des pratiques de gestion et des conditions de travail favorables à son intégration dans la routine quotidienne des employés. Cela peut se traduire par :

- La mise en place d'installations sportives sur le lieu de travail,
- Des horaires de travail flexibles pour permettre la participation à des activités physiques,

- Un remboursement ou prise en charge (partielle ou totale) des frais d'adhésion et d'abonnements à des salles de sport.
- La sensibilisation des employeurs et des travailleurs aux risques liés à la sédentarité et aux avantages de l'activité physique en fournissant des ressources et des informations sur les bienfaits de l'exercice régulier.
- La promotion de la pratique d'activités physiques au travail en organisant des compétitions ou des défis entre les entreprises afin de favoriser la cohésion sociale et l'esprit d'équipe tout en incitant à l'activité physique.
- L'établissement de partenariats avec des professionnels de la santé, tels que des nutritionnistes ou des kinésithérapeutes, pour offrir des services de conseil et d'accompagnement aux employés dans la pratique de l'activité physique.

De plus, il est essentiel que la direction soit impliquée dans la mise en place d'un programme de promotion de l'activité physique.

Comme le souligne le rapport « Le bien-être des salariés en France » publié par le Centre d'études prospectives et d'informations sur l'emploi (CEPREMAP) en 2021, les entreprises jouent un rôle fondamental dans la promotion du bien-être de leur facteur humain. Selon ce rapport, les salariés français sont globalement satisfaits de leur travail. Ils valorisent notamment la fierté du travail bien fait, le sens de leur contribution et les relations qu'ils entretiennent avec leurs collègues. Cependant, ils sont également confrontés à des facteurs de stress professionnel, tels que la charge de travail, l'incertitude ou les relations socioprofessionnelles conflictuelles. Dans cette perspective, le rapport identifie plusieurs leviers que les entreprises peuvent actionner pour promouvoir le bien-être de leurs salariés. Ces leviers concernent notamment :

- La culture organisationnelle : les entreprises doivent créer un environnement de travail favorable au bien-être, en valorisant le travail bien fait, en favorisant les relations sociales et en luttant contre les facteurs de stress.
- Les conditions de travail : les entreprises doivent s'assurer que les conditions de travail sont adaptées aux besoins des salariés, en termes de sécurité, d'ergonomie et d'aménagement des locaux.
- Les politiques des Ressources Humaines (RH) : les entreprises doivent mettre en place des politiques RH favorables au bien-être, notamment en promouvant la pratique d'une activité physique sur le lieu de travail.
- L'autonomie et la responsabilisation : les salariés qui ont un sentiment d'autonomie et de responsabilisation sont plus motivés et épanouis au travail. Ce sentiment est favorisé par l'engagement dans une pratique régulière d'activité physique.

Le rapport souligne que les entreprises françaises qui investissent dans le bien-être de leurs salariés parviennent à créer un environnement professionnel plus attractif et productif, faisant ainsi de la qualité de vie au travail un enjeu organisationnel majeur. Selon des études menées par Baicker et al. (2015) et

van Dongen et al. (2016), les entreprises qui encouragent l'activité physique au travail en mettant en place des aménagements favorables, tels que des salles de sport ou la mise à disposition d'équipements dédiés à la pratique physique et sportive, constatent une augmentation de la productivité et une baisse des coûts de santé liée à des problèmes de santé d'origine professionnelle (BAICKER Katherine, 2015 ; VAN DONGEN J-M, 2011).

En somme, des salariés présents et efficaces au travail constituent, sans contredit, des éléments cruciaux pour la performance d'une entreprise. Les travailleurs physiquement actifs, qui pratiquent régulièrement une activité physique au travail, jouissent d'un meilleur état de santé que leurs collègues sédentaires.

La pratique d'une activité physique au travail favorise la baisse des troubles de la santé mentale liés au stress professionnel, ce qui améliore la sensation de bien-être au travail.

III. Les défis et les facteurs de succès des programmes d'activité physique en milieu professionnel

La mise en place de programmes d'activité physique en milieu professionnel peut se heurter à certains obstacles.

Tout d'abord, l'un des défis majeurs consiste à sensibiliser et à motiver les employés à participer à ces programmes. En effet, certaines personnes peuvent hésiter à s'engager dans des activités physiques au travail en raison de contraintes de temps, de limitations physiques ou d'un manque d'intérêt initial (JONES Brian, 2022).

Un autre obstacle peut être lié aux ressources et aux infrastructures nécessaires pour mettre en œuvre ces programmes (WHITSEL Laurie, 2023). Il peut être difficile pour certaines organisations de fournir des équipements sportifs ou des installations adaptées pour permettre aux employés de faire de l'exercice pendant leurs heures de travail (WILLIAMS Christopher, 2023). De plus, la disponibilité d'espaces appropriés peut également constituer un défi, en particulier dans les environnements de travail où l'espace est limité (O'CONNOR James, 2023).

Les aspects organisationnels et culturels peuvent également constituer de potentiels freins. Par exemple, certaines organisations peuvent se concentrer principalement sur la productivité, ce qui peut limiter l'importance accordée à l'activité physique des employés (JACKSON Mervyn, 2023). En outre, certains employés peuvent avoir des préoccupations quant à l'impact de leur participation à ces programmes sur leur charge de travail quotidienne ou sur la perception de leurs collègues.

Pour surmonter ces obstacles, certains facteurs de succès doivent être pris en compte. Il est essentiel de soutenir activement ces initiatives et communiquer efficacement sur les avantages de l'activité physique en milieu professionnel (GREEN Robert, 2023).

Enfin, la flexibilité et l'adaptabilité des programmes d'activité physique peuvent jouer un rôle clé dans leur succès. En offrant une variété d'options d'exercice, adaptées aux intérêts et aux besoins individuels des employés, il est possible de maximiser leur participation (TURNER Jan, 2022). De plus, l'intégration de ces programmes dans la routine de travail quotidienne, en les rendant facilement accessibles et en les

intégrant dans les horaires de travail des employés, peut aider à surmonter les contraintes de temps (CLARK Sarah, 2022).

En résumé, bien que la mise en place de programmes d'activité physique en milieu professionnel puisse être confrontée à des défis, il est possible de les surmonter en s'attaquant aux obstacles potentiels et en mettant en œuvre des facteurs de succès tels que la sensibilisation des employés, le soutien de la direction et la flexibilité du programme.

Cette combinaison d'efforts peut favoriser un environnement de travail plus sain et plus actif, avec des bénéfices notables tant pour les employés que pour l'organisation dans son ensemble.

Conclusion

Le milieu de travail joue un rôle privilégié pour encourager les salariés à réduire les comportements sédentaires et à adopter une routine professionnelle plus saine et active. Cependant, il est important de souligner que certains facteurs liés aux organisations peuvent influencer le bien-être des employés, positivement ou négativement. C'est pourquoi la promotion de l'activité physique sur le lieu de travail est essentielle pour favoriser à la fois la santé des travailleurs et celle de l'ensemble de l'organisation.

Dans une société en constante évolution, caractérisée par l'émergence des nouvelles technologies, il est fondamental d'adopter des mesures fiables pour contrer la baisse significative du niveau d'activité physique, et la hausse de la sédentarité au quotidien. Cet article met en évidence l'importance de l'activité physique régulière pour réduire les comportements sédentaires, maintenir une bonne santé et prévenir les maladies chroniques les plus courantes.

La recherche dans le domaine des sciences de l'activité physique est en plein essor. Alors qu'elle était autrefois axée sur les comportements globaux, leurs déterminants et leurs effets sur la santé, elle se concentre désormais sur des domaines spécifiques déterminés en fonction du contexte de travail. Dans cette perspective, on peut formuler l'hypothèse selon laquelle, la modification du comportement global d'un individu est difficile, mais il est peut-être plus facile de changer un comportement dans un cadre spécifique.

C'est ce qui nous a permis de comprendre que l'activité physique au travail revêt une importance capitale, car elle permet d'atteindre les niveaux recommandés d'activité physique sans perturber la routine quotidienne des individus.

Notre article suggère donc que les interventions en santé publique doivent cibler des comportements spécifiques, définis en accord avec l'environnement de travail. Dans le cadre professionnel, nous avons accordé une attention particulière aux liens entre l'activité physique, la sédentarité et certains facteurs associés, ainsi qu'à leurs effets sur la santé. À l'avenir, il sera essentiel de mieux comprendre l'impact des caractéristiques de l'environnement professionnel (ou de l'espace de pratique) sur le niveau d'activité physique quotidien des individus, en plus des facteurs individuels déjà étudiés. En tenant compte de ces éléments, nous pourrions développer des stratégies efficaces pour promouvoir un mode de vie actif et préserver la santé de la population.

Références

- American College of Sports Medicine. 2017. ACSM's guidelines for exercise testing and prescription, 10th edition. s.l.: Wolters Kluwer, 2017. p. 472.
- ANM. 2022. Activités physiques et sportives au travail, une opportunité pour améliorer l'état de santé des employés. Paris : Académie Nationale de Médecine, 2022.
- ANSES. 2019. Recommandations relatives à l'activité physique et à la sédentarité. Saint-Denis, France: ANSES, 2019.
- BAICKER Katherine, et al. 2015. Workplace wellness programs can lower health costs. s.l.: Health Aff (Millwood), 2015. pp. 2295-2304. vol. 34.
- BARON Kelly, et al. 2013. Exercise to improve sleep in insomnia: exploration of the bidirectional effects. s.l.: Journal of Clinical Sleep Medicine, 9(8), 2013. pp. 819-824.
- BERTHELOT Jean-Michel, et al. 2017. Les déterminants de la sédentarité au travail : une revue systématique. s.l. : Médecine du Travail, 2017. pp. 676-686. vol. 104.
- BESS Marcus. 2006. Physical activity intervention studies: What we know and what we need to know: A scientific statement from the American Heart Association Council on Nutrition, Physical Activity, and Metabolism (Subcommittee on Physical Activity); Council on Cardiovascula. s.l.: Circulation, 2006. pp. 2739-2752. vol. 114.
- BIALÈS Christian. 1997. Emploi-croissance-productivité-durée de travail : relations fondamentales et réflexions de base. s.l. : Cahiers d'Économie et Gestion, 1997. vol. 53.
- BJØRNSKOV Christian, & MURPHY Ryan. 2017. The causal effect of happiness on productivity. s.l.: Journal of Labor Economics, 35(4), 2017. pp. 707-747.
- BLOND Kim, et al. 2020. Association of high amounts of physical activity with mortality risk: a systematic review and meta-analysis. s.l.: British Journal of Sports Medicine, 2020. pp. 1195-1201. vol. 54.
- BROWN Denver, et al. 2022. The impact of workplace physical activity on mental fatigue and sleep quality. s.l.: Journal of Occupational Health Psychology, 27(1), 2022. pp. 86-98.
- CANCELLIERE Carol, et al. 2015. Participation and adherence to workplace exercise programs: a systematic review. s.l.: Preventive Medicine, 2015. pp. 88-98. vol. 72.
- CLAEYS Frank, et al. 2018. The impact of telework on physical activity: A systematic review. s.l.: International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018. p. 296. vol. 15.
- CLARK Sarah, & ROGERS Kate. 2022. Incorporating workplace physical activity into daily routines: Strategies for overcoming time constraints. s.l.: Journal of Occupational Health Management, 2022. pp. 192-208. vol. 16.
- CORDER Kirsten, et al. 2020. Changes in physical activity, diet, and body weight across the education and employment transitions of early adulthood: A systematic review and meta-analysis. s.l.: Obes Rev, 2020. vol. 21.

CORMAC Ryan, et al. 2011. Sitting patterns at work: Objective measurement of adherence to current recommendations. s.l.: Ergonomics, 2011. pp. 531-538. vol. 54.

DALLONGEVILLE Jean, et al. 2023. The impact of occupational sedentary behavior on health: A systematic review of prospective studies. s.l.: Journal of Occupational and Environmental Medicine, 2023. pp. 256-267. vol. 65.

DE SAINT-HILAIRE Zara. 2006. Des insomnies. Zara De Saint-Hilaire éd, L'insomnie. Paris : Presses Universitaires de France, 2006. pp. 38-58.

DESPRÉ Jean-Pierre. 2012. Body Fat Distribution and Risk of Cardiovascular Disease: An Update. s.l.: Circulation, 2012. pp. 1301-1313. vol. 126.

DUFOREZ François, & LÉGER Damien. 2008. Sleep management and the performance of eight sailors in the Tour de France. s.l.: International Journal of Sports Physiology and Performance, 2008. pp. 21-30. vol. 30.

DUPONT François, et al. 2019. Health and productivity at work: Which active workstation for which benefits? A systematic review. s.l.: Occupational & Environmental Medicine, 2019. pp. 281-294. vol. 76.

ENGBERS Luuk, et al. 2009. Worksite health promotion programs with environmental changes: A systematic review. s.l.: American Journal of Preventive Medicine, 2009. pp. 61-70. vol. 29.

Eurofound. 2016. The impact of workplace health and well-being on business performance. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016.

FLETCHER Gary, & FRISHMAN Warren. 2023. Secondary prevention of coronary heart disease. s.l.: Journal of the American College of Cardiology, 2023. pp. 217-238. vol. 91.

GALLAGHER David, et al. 2014. The impact of occupational physical activity on health: A systematic review. s.l.: Am J Prev Med, 2014. pp. 563-573. vol. 46.

GARNIER Alain, et al. 1996. Aspects bénéfiques de la pratique des activités physiques et sportives. In Actualité et dossier en santé publique. s.l. : Haut Conseil de la santé publique, 1996. pp. 236-251. vol. 14.

GLEESON Michael, et al. 2013. Exercise Immunology. s.l.: Routledge, 2013. p. 456.

GREEN Robert, et al. 2023. Educating and engaging employees in workplace physical activity programs: A systematic review of interventions. s.l.: Journal of Health Promotion, 2023. pp. 310-325. vol. 28.

HUTCHINSON Amanda, & WILSON Carlene. 2012. Improving nutrition and physical activity in the workplace: a meta-analysis of intervention studies. s.l.: Health Promotion International, 2012. pp. 238-49. vol. 27.

JACKSON Mervyn. 2023. Organizational cultural factors and physical activity promotion in the workplace. s.l.: Journal of Occupational Health Psychology, 2023. pp. 43-57. vol. 32.

JOHNSON Jennifer, et al. 2020. The impact of workplace physical activity programs on employee mental resilience. s.l.: Journal of Occupational and Organizational Psychology, 2020. vol. 93.

- JONES Brian. 2022. Challenges and benefits of workplace physical activity. London: Journal of Occupational and Environmental Medicine, 2022. pp. 723-730. vol. 64.
- KATZMARZYK Peter, et al. 2009. Sitting time and mortality from all causes, cardiovascular disease, and cancer. s.l.: Medicine and Science in Sports and Exercise, 2009. pp. 998-1005. vol. 41.
- KREDLOW Alexandra, et al. 2015. The effects of physical activity on sleep: a meta-analytic review. s.l.: Journal of Behavioral Medicine, 2015. pp. 427-449. vol. 38.
- LOCKE Edwin, et al. 2002. Building a practically useful theory of goal setting and task motivation: A 35-year odyssey. s.l.: American Psychologist, 2002. pp. 705-717. vol. 57.
- O'CONNOR James, et al. 2023. Designing workplace environments for physical activity: Strategies for optimizing small spaces. s.l.: Journal of Ergonomics, 12(4), 2023. pp. 215-230.
- O'DONOVAN Gary, et al. 2018. Effectiveness of communication, information and education (CIE) interventions to promote physical activity in the workplace: A systematic review and meta-analysis. s.l.: Preventive Medicine, 2018. pp. 110-117.
- OMS. 2018. Plan d'action mondial pour promouvoir l'activité physique 2018-2030. Genève, Suisse : Organisation mondiale de la santé, 2018.
- PLANCHARD Jo-Hanna, BAILLY Laurent, TIFRATÉNE Karim et al. 2018. Promotion de la santé par l'activité physique sur les lieux de travail : expérimentation participative dans une entreprise privée. s.l. : Santé Publique, 2018. pp. 169-176. vol. 30.
- PRATT Michael, et al. 2006. Physical activity and health: A review of the evidence. s.l.: Med Sci Sports Exerc, 2006. pp. 1423-1434. vol. 38.
- PRONK Nicolaas, et al. 2012. Pay-for-Performance Incentives in Low-Income Population Employees: Acceptability and Effects on Health Behavior. s.l.: American Journal of Health Promotion, 2012. pp. 160-165. vol. 26.
- Proudfoot Consulting. 2004. Étude sur la santé et le bien-être des salariés en France. Paris: Proudfoot Consulting, 2004.
- SHRESTHA Nipun, et al. 2018. Workplace interventions for reducing sitting at work. s.l.: The Cochrane database of systematic reviews, 2018. vol. 6.
- SINGH Manpreet, et al. 2023. Effectiveness of physical activity interventions for improving depression, anxiety and distress: an overview of systematic reviews. s.l.: British Journal of Sports Medicine, 2023. pp. 1199-1209. vol. 57.
- STULTS-KOLEHMAINEN Matthew, & SINHA Rajita. 2014. The Effects of stress on Physical Activity and Exercise. Auckland, N.Z: Sports Medicine, 2014. pp. 81-121. vol. 44.
- TUDOR-LOCKE Catrine, et al. 2011. How many steps/day are enough? For adults. s.l.: International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity, 2011. vol. 8.
- TURNER Jan. 2022. The importance of program flexibility in workplace physical activity initiatives. s.l.: Journal of Applied Research in Human Resource Management, 2022. pp. 134-149. vol. 14.

VAN DONGEN J-M, et al. 2011. Systematic review on the financial return of worksite health promotion programmes aimed at improving nutrition and/or increasing physical activity. s.l.: Obesity reviews: an official journal of the International Association for the Study of Obesity, 2011. pp. 1031–1049. vol. 12.

WHITSEL Laurie. 2023. Editors' Desk - Creating a Movement for Healthy Physical Activity at Work. s.l.: American journal of health promotion: AJHP, 2023. pp. 722–723. vol. 37.

WILLIAMS Christopher, & JOHNSON David. 2023. Providing access to sports equipment and facilities in the workplace: A practical guide for organizations. s.l.: Journal of Occupational and Environmental Medicine, 2023. vol. 45.

Zarifian, P. 2011. Le travail et l'organisation. Paris : La Découverte, 2011.



**Les journées de
l'interdisciplinarité**

Former les enseignants et CPE novices à la coopération : un enjeu pour l'école de demain

Training novice teachers and CPEs in cooperation: a challenge for the school of tomorrow

Fabienne PERROT

INSPE de Limoges

fabienne.perrot@unilim.fr

Vivien MORIN

INSPE de Limoges

vivien.morin@unilim.fr

URL : <https://www.unilim.fr/journees-interdisciplinarite/740>

DOI : 10.25965/lji.740

Licence : CC BY-NC-SA 4.0 International

Résumé : La coopération des équipes en EPLE (établissement public local d'enseignement) est un des enjeux majeurs de la réussite de tous les élèves. S'agissant de compétences professionnelles qui ne sont pas innées mais construites tout au long de la carrière des enseignants et CPE (conseiller principal d'éducation), il paraît incontournable de s'y intéresser dès la formation initiale, au moment même où de jeunes enseignants et CPE novices construisent puis développent leur posture éducative au travers de l'apprentissage de gestes professionnels complexes et interreliés. Cet article expose une démarche de formation et d'évaluation des compétences de coopération dans l'enseignement supérieur à travers une expérimentation menée depuis cinq ans à l'INSPÉ de Limoges. Au-delà du compte-rendu, il invite à une réflexion approfondie sur le design pédagogique à élaborer en formation initiale pour répondre aux enjeux de formation et aux défis scolaires.

Mots clés : coopération, compétences, équipe, évaluation, formation initiale

Abstract: The cooperation of teams in EPLE (local public educational establishment) is one of the major challenges for the success of all students. Concerning professional skills which are not innate but built throughout the career of teachers and CPE (principal education advisor), it seems essential to take an interest in them from initial training, at the very moment when young people Novice teachers and CPEs build and then develop their educational posture through learning complex and interrelated professional gestures. This article presents an approach to training and evaluating cooperation skills in higher education through an experiment carried out over five years at the INSPÉ in Limoges. Beyond the report, it invites in-depth reflection on the educational design to be developed in initial training to respond to training issues and academic challenges.

Keywords: cooperation, skills, team, evaluation, initial training

Introduction : Faire coopérer les équipes pédagogiques en EPLE : utopie ou réalité ?

La collaboration et la coopération sont instituées dans les textes officiels, notamment depuis 2013 dans la Loi de refondation de l'école : « Pour garantir la réussite de tous, l'école se construit avec les parents. [...] Elle s'enrichit et se conforte par le dialogue et la coopération entre tous les acteurs de la communauté éducative ». Le référentiel de compétences des métiers du professorat et de l'éducation y fait également largement mention, instaurant des compétences communes et transversales liées au travail en équipe. Citons par exemple : "Coopérer au sein d'une équipe" ou encore "Coopérer avec les parents d'élèves" ou enfin "Coopérer avec les partenaires de l'école" (Compétence commune n° 9 dans le Référentiel des compétences des métiers du professorat et de l'éducation, 2013). Ces nouvelles compétences professionnelles affirment donc la nécessité pour tous les enseignants et tous les conseillers principaux d'éducation (CPE) de trouver des modalités de coopération entre pairs, entre les élèves, avec des partenaires internes et externes et y compris avec les parents d'élèves, pour garantir la réussite de leurs élèves. Il est donc légitime que la formation initiale s'y intéresse et vise ces compétences de coopération entre tous les acteurs de l'École (Buhot & Cosnefroy, 2011).

Dans le même mouvement, la création des ESPE puis des INSPE et la maîtrise des parcours renforcent l'idée d'une professionnalisation des formations initiales enseignantes, notamment par le recours aux outils de réflexions sur la pratique (Lapostolle, 2013), notamment liés aux compétences du travail en équipe qui s'acquièrent sur le terrain, mais aussi en formation initiale. La coopération est au cœur de la professionnalisation des enseignants et des CPE novices, elle est un de ses principaux "corollaires" ainsi que l'affirme Philippe Perrenoud (2013). Il s'agit là d'un des enjeux majeurs de la formation des novices, en cela qu'elle est le moyen de développer avec ses pairs, de véritables habiletés coopératives à mobiliser dans des contextes familiers puis de véritables compétences professionnelles mobilisables en contexte inédit et complexe (Le Boterf, 2018). Un des objectifs de la formation initiale est donc de permettre le développement de compétences professionnelles de coopération pour des enseignants et des CPE novices qui s'inscrivent dans un parcours de formation complexe, d'autant qu'il est doublé d'une préparation au concours du 2nd degré dont les objectifs ne sont pas toujours compatibles avec cette professionnalisation.

Si la coopération au sein de la formation initiale s'inscrit dans une logique institutionnelle et professionnelle, il est également pertinent de la considérer dans une logique pédagogique et didactique. En effet, les études scientifiques montrent que les équipes qui coopèrent font mieux réussir les élèves (Gibert, 2018). Elles permettent le développement des relations interpersonnelles positives, un soutien social et une meilleure estime de soi. Conjointement, les études portant sur les bénéfices scolaires de la coopération entre élèves mettent l'accent sur le rôle capital de la collaboration des équipes (Connac, 2018). L'enjeu est donc de faire réussir tous les élèves en mobilisant l'intelligence collective de tous les personnels des EPLE. La coopération contribue visiblement à construire l'identité des équipes pédagogiques et a un impact important sur l'effet établissement (Perrenoud, 1993) dont l'effet sur la réussite des élèves est notable dès lors que les équipes ont une culture commune de la collaboration, qu'elles sont engagées dans une posture collective réflexive permettant des ajustements pour atteindre les objectifs fixés (Gather-Thurler & Perrenoud, 2005).

Cependant, peu d'équipes pédagogiques s'engagent réellement dans le développement professionnel collectif et la formation continue offre peu d'opportunités de se former aux pratiques coopératives (Gather-Thurler, 1996). La plupart des activités de collaboration ou de coopération sont informelles, se déroulent devant la machine à café sans être instituées. De nombreux enseignants sont formés dans l'idée d'une responsabilité individuelle, celle de gérer leur classe, de mener à bien leur programme disciplinaire. Les problèmes rencontrés ne peuvent être solutionnés dans cette dynamique, même avec des entraides occasionnelles ou des "trucs" qu'on se transmet oralement. Le mythe de "l'individualisme efficace" (Ibid.) perdure alors même que les gestes professionnels propices aux apprentissages dépendent en grande partie du collectif et de la capacité des uns à coopérer avec les autres, à s'inscrire dans un système d'interdépendance positive. Si beaucoup reconnaissent le bien-fondé de travailler collectivement à la réussite des élèves, ils se heurtent à de nombreuses difficultés dans sa mise en œuvre. Coopérer devient alors une gageure.

Toutes ces raisons nous ont conduits à empoigner cette problématique dès la formation initiale et à essayer de penser le développement des compétences de coopération pour favoriser le travail en équipe des futurs titulaires. Missionnés pour assurer la formation transversale des étudiants de Master MEEF 2nd degré, nous avons un terrain favorable pour expérimenter des dispositifs de formation et pour évaluer leur pertinence : des étudiants de tous les parcours de formation inscrits dans un travail collectif similaire à celui d'une équipe pédagogique en EPLE. Depuis cinq années, nous avons rencontré et formé près de sept-cent étudiants. C'est le fruit de ce travail que nous présentons ici.

1. Développer des compétences de coopération par la coopération

Un des premiers axiomes de notre travail qui perdure depuis le début de l'expérimentation est de construire la formation transversale autour de groupes pluridisciplinaires d'étudiants. Il s'agit de faire en sorte que les enseignants et CPE novices se rencontrent, qu'il y ait une véritable hétérogénéité dans des équipes construites dans la durée, autour d'une dynamique collective et avec un but commun (Baudrit, 2007). Parmi les critères de constitution des équipes se trouvent pêle-mêle la mixité, la nécessité d'une représentation de plusieurs disciplines, ou encore des rôles que chacun pense pouvoir assumer au sein du collectif. Très vite, l'enjeu est de passer d'une logique de groupe à une logique d'équipe, d'une logique de collaboration à une logique de coopération. Ce cadre constitue les prémices de dispositifs de formation dédiés au développement des compétences que nous voulions cibler, même si la dynamique de la coopération repose sur bien d'autres aspects. Faire vivre ensemble, puis faire travailler ensemble pour enfin faire apprendre ensemble, tels ont été les leitmotiv de notre démarche.

Une coopération porteuse d'apprentissage sous-entend le respect d'un certain nombre de conditions complémentaires mises en évidence par quatre modélisations. Celles-ci font référence aux communautés d'apprentissage professionnelles (CAP) évoquées dans le dossier de veille de l'IFé N° 124 (Gibert, 2018). Ces modèles permettent de repérer des dimensions fondamentales à prendre en compte pour déclencher, diriger, intensifier et favoriser la persistance de la motivation en direction d'un travail collectif (Viau, 1994).

1.1. L'interdépendance positive autour d'un objectif commun

L'interdépendance positive est un principe qui s'appuie sur les compétences individuelles de chacun des membres d'un groupe mises au service d'un objectif commun qui demande que chacun s'engage à assurer une part de la responsabilité collective. C'est l'une des caractéristiques des tâches complexes qui seront toujours résolues collectivement d'une manière plus efficace que ce que le meilleur des membres du groupe aurait produit seul (Abrami et al., 2000). En conséquence, les enseignants novices sont informés, dès le début de la formation, de l'objectif à atteindre en équipe, des compétences à mobiliser pour y parvenir et des modalités d'évaluation collective qui permettront de vérifier leurs compétences. De plus, ils reçoivent des commandes régulières, précises et concrètes à chaque étape du processus d'apprentissage et sont amenés à comprendre que l'atteinte de l'objectif commun passe par l'alliance de leurs forces individuelles. L'objectif est fixé de telle sorte qu'il soit en "décalage optimal" (Allal et al.1979) avec les possibilités d'une équipe de cinq personnes. Cette notion signifie que la tâche proposée correspond à un niveau supérieur par rapport aux possibilités individuelles d'un sujet mais que l'objectif peut être atteint si chacun apporte une contribution active au projet du groupe. Dialogue et concertation sont alors essentiels pour construire un consensus ainsi que la répartition des tâches. La co-construction s'effectue à partir de sources d'informations et l'utilisation de données à leur disposition qui sont nécessairement partagées. "L'interdépendance peut se créer par les ressources matérielles (...). On peut aussi la créer par l'expertise. Non pas que des personnes aient une expertise préalable à l'accomplissement de la tâche, mais on peut leur donner les moyens de devenir des experts. Il faut utiliser une structure de travail qui comporte des groupes de base d'où l'on retire un ou des étudiants, le temps qu'ils s'approprient certaines connaissances qui, lorsque ces étudiants regagneront leur groupe de base, feront d'eux des experts." (Lavergne, 1996). Ainsi, nous alternons les temps de travail en équipe avec des temps en atelier où les membres de l'équipe se séparent en fonction de leurs appétences ou expertises préalables pour ensuite mettre en commun leurs découvertes. Par exemple, lors de l'intervention de formateurs experts de la prise en charge des adolescents (psychologues, sociologues, médecins, assistantes sociales...), le travail débute en équipe par une réflexion problématisée autour d'un cas d'étude repéré en établissement scolaire puis, dans un second temps, chaque membre part à la rencontre d'un expert pour une formation ciblée et enfin, dans un troisième temps toute l'équipe se retrouve pour synthétiser et sélectionner les éléments utiles pour répondre à la problématique posée.

Photographie 1 : répartition des tâches au sein de l'équipe



1.2. La responsabilité individuelle

L'interdépendance positive déclenche et génère la responsabilisation des membres de l'équipe, c'est-à-dire qu'ils sont amenés à faire des choix de tâches, puis à les assumer. Les novices saisissent à la fois l'intérêt d'apprendre pour soi, de s'impliquer activement dans la tâche, mais aussi de comprendre que leur rôle dans le groupe est essentiel. Assumer ses responsabilités impose d'avoir confiance en soi et en ses capacités. Pour faciliter les choix, une fiche des rôles (figure 1) sert de point de départ et de point de repère en fonction des tâches traversées pendant les séances de travail. Ainsi les rôles s'avèrent interchangeables, cumulables et dissociables en fonction des besoins de l'équipe et de l'avancée du projet. Nous insistons sur l'importance de former les membres de l'équipe à clarifier les rôles, leur répartition à un instant T et les permutations au fil du travail. Les rôles peuvent être définis socialement ou non (dans le dernier cas, on parlera de la "place"), imposés ou spontanés, figés ou mobiles, statiques ou évolutifs. Baker en 2008 parle de degrés de symétrie, d'accord ou d'alignement de rôles entre le quêteur (qui propose/sollicite), l'animateur (qui gère), le vérificateur (qui critique) et l'indépendant (qui vérifie). Nous nous efforçons alors de favoriser "un fonctionnement démocratique avec un leadership partagé et des changements possibles de répartition des pouvoirs, une facilité de participation géographique, organisationnelle et temporelle" (Gibert, 2018). Pour conclure cet aspect, nous retenons la synthèse de Hatchuel (1996) pour qui « coopérer, c'est rechercher une définition partagée du travail de chacun ».

Figure 1 : Les rôles à pourvoir dans l'équipe, interchangeables et évolutifs



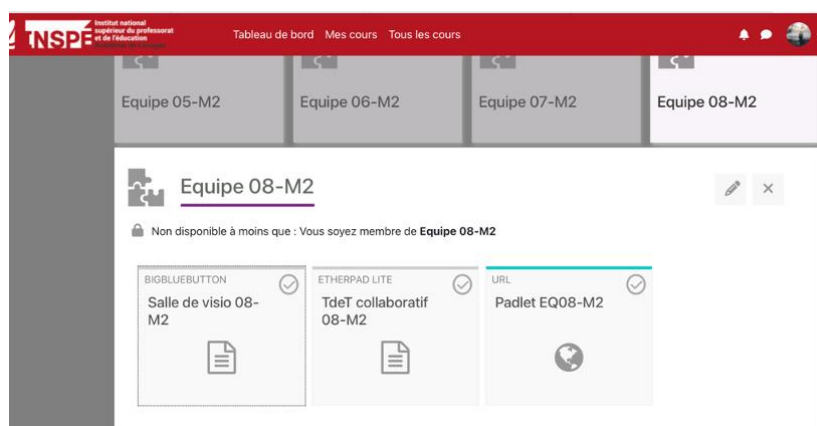
1.3. La promotion des informations

Nous avons évoqué plus haut que chaque tâche proposée aux équipes est soutenue par la distribution de sources d'informations et l'utilisation de données mises à leur disposition. Concernant notre fonctionnement, l'ensemble des informations et ressources utiles sont centralisées sur la plateforme Moodle. Chaque membre de l'équipe détient également des informations singulières liées à sa formation disciplinaire et à ses recherches personnelles. Toutes ces informations destinées à être mises en commun impliquent le développement de l'entraide, le partage des savoirs et le soutien pour la réussite du groupe. Il s'agit de former les enseignants novices à comprendre qu'échanger des informations permet d'avancer vers l'objectif fixé à condition d'être capable de débattre, d'argumenter, de trier, de synthétiser. "La

production de savoirs professionnels dans le cadre d'un apprentissage collectif avec des apports internes et externes se doit d'être visible et partagée, l'expertise pouvant être diffusée lors d'une production finale" (Gibert, 2018). Pour les aider dans ce tri des informations, les novices disposent d'un espace numérique de travail spécifiquement dédié à leur équipe (padlet, traitement de texte collaboratif, salle de visio - photographie 2). Cet espace est supervisé par un formateur qui peut ainsi rapidement et régulièrement voir les informations partagées par le groupe ainsi que l'avancée du projet. C'est également sur cet espace que sont déposés tous les travaux intermédiaires et les évaluations, ce qui concourt à la fois à la visibilité et au partage. Ces différents éléments deviennent ensuite des "traces" (Baines, Rubie-Davies & Blatchford, 2009) propres à démontrer les compétences visées par les différentes activités :

« Dans la construction de sa fonction, propre à la définition des tâches, le coéquipier donne des informations aux autres membres sur sa contribution au développement du projet et ainsi sur son statut au sein de l'équipe. La division du travail, lorsque l'activité productrice est visible pour les membres de l'équipe, génère la reconnaissance de l'appartenance au groupe », (Dameron, 2005).

Photographie 2 : espace numérique de partage d'information d'équipe



1.4. Les habiletés coopératives

Travailler en coopération nécessite de développer des habiletés sociales, cognitives, émotionnelles et langagières définies par l'OMS comme :

« un groupe de compétences psychosociales et interpersonnelles qui aident les personnes à prendre des décisions éclairées, à résoudre des problèmes, à penser de façon critique et créative, à communiquer de façon efficace, à construire des relations saines, à entrer en empathie avec les autres, à faire face aux difficultés et à gérer leur vie de manière saine et productive ».

Nous retenons par exemple, savoir communiquer à l'oral, gérer les conflits, accepter l'avis de l'autre, écouter, faire preuve d'empathie... (Évangéliste-Perron, 1996). Plus globalement et en s'inspirant des travaux de Johnson, Johnson et Holubec (1984), les habiletés coopératives peuvent être regroupées en quatre catégories : les habiletés de réflexion (de raisonnement) ; les habiletés de résolution de problèmes

(de métamorphose, de transformation, de conceptualisation) ; les habiletés de gestion (normes de participation au travail de groupe) ; les habiletés de rassemblement (interdépendance positive).

Pour notre part, nous proposons une fiche d'évaluation du processus coopératif découpée en trois verbes d'actions distincts et complémentaires, déclinés en observables : “communiquer-réfléchir-organiser” (Figure 2). Notons que cette taxonomie en 3 catégories a été conçue lors d'un séminaire de travail où étaient conviés des chefs d'établissement impliqués dans la formation initiale. Ces derniers ont pu partager ainsi leur vision et attentes en tant que pilote d'équipe pédagogique. A titre d'exemple, pendant le travail d'équipe, un formateur peut observer en silence la communication et repérer dans les échanges et la répartition des tâches si les membres de l'équipe proposent aux autres de “s'exprimer pour que tous participent de manière égale”. En outre, des temps d'auto-évaluation sont organisés par les formateurs pour inciter les étudiants à se positionner individuellement et collectivement sur ces critères. Parallèlement, d'autres indicateurs viennent compléter l'analyse, notamment le fait de conduire l'équipe à déterminer si effectivement “chacun écoute, chacun parle, chacun participe aux choix...” etc. Ces observables, manipulés régulièrement, conduisent à des prises de conscience et à faire émerger les besoins d'aide comme par exemple la mise en place d'un bâton de parole ou de votes. De façon encore plus spécifique, Baines, Rubie-Davies & Blatchford, (2009), soulignent l'intérêt du repérage des « opérations cognitives-langagières » qui représentent les « traces » d'apprentissage coopératif. Ainsi, les équipes qui font preuve de temps de “discussion métacognitive sur le fonctionnement du groupe pour constater et/ou réguler leur action” sont considérées comme avancées dans le processus coopératif. Dans notre démarche, l'évaluation formatrice régulière via ces indicateurs précis, constitue un élément central dans la formation des novices, à la fois comme une fin et un moyen d'apprentissages. Buchs, C. (2017) souligne à ce sujet « le caractère constructif des interactions sociocognitives que l'enseignant peut s'efforcer de structurer par une activité et des consignes qui impliquent un enseignement réciproque entre pairs, une co-construction des connaissances mettant l'accent sur le questionnement mutuel et l'apport d'explications élaborées, et des confrontations de points de vue visant une compréhension raisonnée des différentes positions ».

Figure 2 : Les habiletés coopératives observées lors des échanges dans l'équipe

Compétences évaluées	Communiquer	Réfléchir	Organiser	Critères de réussite collective*
Habilités coopératives observables	1. Écouter (savoir écouter une idée, ne pas couper la parole, se regarder, ne pas être sur son téléphone)	6. Contextualiser la situation de travail	14. Attribuer clairement les rôles de chacun dans l'équipe	*Claudette Évangéliste-Perron, Martine Sabourin, et Cynthia Sinagra, <i>Apprendre la démocratie</i> , Montréal, Chenelière/McGraw-Hill, 1996 Un travail d'équipe est fonctionnel lorsque : <input type="checkbox"/> Chacun parle ; <input type="checkbox"/> Chacun écoute ; <input type="checkbox"/> Chacun essaie de comprendre les idées des autres ; <input type="checkbox"/> Chacun participe au choix des meilleures idées ; <input type="checkbox"/> Chacun participe à l'élaboration d'une solution.
	2. Attendre son tour et demander le droit de parole	7. Expliquer, réexpliquer, reformuler	15. Répartir les tâches	
	3. Parler (poser sa voix sans agressivité, utiliser un niveau de langue compatible avec la posture attendue d'un référent éducatif)	8. Justifier ses idées (arguer/ problématiser/ conceptualiser)	16. Redistribuer les rôles si besoin	
	4. Proposer aux autres de s'exprimer pour participer de manière égale	9. Résumer les idées de l'équipe	17. Gérer le temps	
	5. Partager des informations de manière claire	10. Aider les autres à reformuler et à décider	18. Adapter sa stratégie de travail (s'auto-ajuster, réorienter les tâches, réguler les désaccords)	
		11. Respecter les idées des autres	19. Faire consensus en intégrant toutes les idées avant choix (vote si besoin)	
		12. Participer au choix des idées retenues	20. Critiquer de manière constructive les idées et non les personnes	
		13. Enrichir les idées des autres ; Générer de nouvelles idées		

1.5. Le passage du groupe à une équipe

Les critères de construction des groupes : une logique comptable

Olivier Devillard (2011), déclare :

« d'expérience, la taille idéale de l'équipe projet dépend de la nature du projet et de l'expertise de ses membres. L'observation et les résultats d'études sur les performances des équipes préconisent de s'entourer d'une petite équipe comprenant entre cinq et douze personnes. Suffisamment petit pour rester dans un registre de proximité et pouvoir partager, suffisamment grand pour être créatif ».

Richard Hackman (2011), expert dans la dynamique et la performance des équipes, a conclu ses cinquante années de recherche en affirmant qu'une équipe de quatre à six personnes est idéale pour accomplir la plupart des tâches et qu'aucune équipe ne devrait compter plus de dix membres. En effet, les grands groupes augmentent le risque de conflits et tensions, sont favorables à la dilution des responsabilités, la confiance est plus longue à s'installer car chacun se connaît moins, les collaborateurs "toxiques" s'y dissimulent davantage, les chefs de projet doivent alors canaliser plus de personnalités et ont dès lors moins de temps pour leur propre travail. A l'aune de ces recherches nous avons tranché en faveur de la constitution d'équipes de quatre ou cinq, pluridisciplinaires (représentation d'au moins trois disciplines différentes), mixité de genre et recherche d'équilibre des rôles. Une petite équipe permet une communication rapide, un management facilité, une plus grande polyvalence dans le partage des tâches, une responsabilisation accrue, une implication amplifiée par le sentiment d'appartenance :

« Au sein d'une petite équipe, il est plus simple de démasquer les imposteurs, les manipulateurs ou ceux qui font semblant de travailler. La pression des pairs est plus forte que celle du management ou de la hiérarchie. Puisque chaque collaborateur se connaît et se respecte, il évite de décevoir ses collègues et devient plus performant » (ibid).

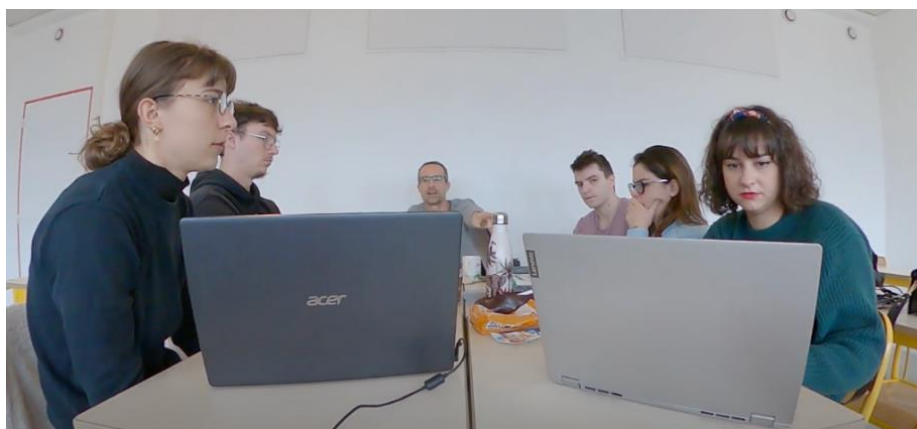
Les groupes sont constitués lors d'une demi-journée de cohésion au cours de laquelle plusieurs défis coopératifs sont proposés par les formateurs. Ces défis sont à la fois l'occasion de créer les groupes (fin) mais aussi un moment de méta-analyse permettant progressivement de s'auto-évaluer sur ses capacités de coopération et sur ses forces pour endosser un ou des rôles au sein de sa future équipe (moyen). En effet, coopérer nécessite de pouvoir faire une analyse réflexive sur le travail effectué, la participation de chaque membre, la communication dans le groupe, la gestion du temps (Lapostolle, 2013). Être capable d'avoir cette réflexion critique permet d'améliorer ses compétences professionnelles de coopération. D'où l'importance de l'observation de la méta-analyse lors de l'évaluation du processus que nous verrons ci-après.

Les critères de construction des groupes : une logique hétérogène

Philip Abrami et al. (2000), présentent plusieurs critères pour former des groupes : hétérogénéité, homogénéité, amitié, intérêt, proximité, hasard, et en soulignent les objectifs, avantages et

inconvenients. Leurs conclusions nous ont incité à faire le choix prioritaire de l'hétérogénéité pour son caractère efficace face à des tâches complexes et à la responsabilisation des membres du groupe. Nous avons ciblé ce choix pour les équipes qui sont évaluées en fin de parcours, par compétences, lors d'un oral collectif. Toutefois, cet aspect est conjugué avec l'exploitation, au cours des apprentissages, des autres formes de groupement : "homogénéité" lors d'atelier de besoins, "amitié" lors des travaux intermédiaires en sous-groupes, "intérêt" lors d'ateliers choisis autour d'un même thème et "hasard" lors de défi coopératifs. En effet, cette alternance des formes de groupement renforce les apprentissages coopératifs et, par-dessus tout, prépare les novices à travailler avec différentes personnes puisqu'ils y seront confrontés de manière accrue dans leur vie professionnelle en EPLE. Ainsi, nous accordons un soin tout particulier, à la fois, à la constitution des groupes en début de formation, mais aussi à la diversité des opportunités de coopération tout au long de leur parcours. Dans cette même logique, nous refusons les changements d'équipe en cours d'année de façon à conduire les membres à dépasser les conflits et dysfonctionnements plutôt qu'à les contourner. Bien évidemment face aux obstacles les formateurs assurent des médiations et profitent de ces moments pour renforcer la méta-analyse quant aux difficultés de coopération qui surgissent. De plus, lors de la deuxième année de formation un temps de réflexion guidé pour constituer les groupes en tenant compte des équipes de l'année antérieure est soigneusement organisé. Lors de nouveaux défis coopératifs et temps d'analyse, les novices décident s'ils continuent à travailler ensemble ou s'ils modifient leurs groupes selon les nouveaux besoins repérés et le projet visé. Par exemple, la contrainte de la présence d'au moins un novice contractuel alternant (CA, c'est à dire en poste seul en classe en Master 2) dans chaque équipe conduit nécessairement à modifier à la marge les équipes de l'année de Master 1 et donc redistribue les cartes de la coopération autour d'un nouveau projet, bâti sur l'étude approfondie d'une classe réelle dont le CA a la charge sur le terrain. Ainsi, la logique hétérogène de construction des groupes domine encore et les contenus du projet conduisent implicitement à nécessairement travailler avec une équipe minutieusement choisie pour adhérer au projet de par son lieu de stage ou la typologie des élèves suivis dans l'année.

Photographie 3 : équipe constituée en phase de suivi avec un formateur



Les tâches coopératives : des activités conjonctives solidaires

D'après la typologie de Steiner relatée par Abrami et al. (ibid), quatre types de tâches coopératives sont exploitables en formation pour favoriser les apprentissages coopératifs : additive ("agir seul à côté des

autres”), disjonctive divisible (“agir chacun sa part”), conjonctive solidaire (“agir avec, par et pour les autres”), disjonctives solidaires (“agir seul, par et pour les autres). Ces tâches sont toutes traversées de manière spontanée ou guidée lors du travail d'équipe en formation mais nous nous efforçons de favoriser de façon prioritaire la troisième catégorie, en jouant sur les contraintes des situations d'apprentissage proposées aux novices. Ainsi, nous concevons des tâches complexes impliquant la participation de tous car nécessitant organisation, réajustements, adaptation, confrontation et justification. Tous les membres se retrouvent donc tributaires les uns des autres car le produit dépend de l'investissement et des compétences de chacun. Notre enjeu est de plonger l'équipe dans un contexte de travail où la performance n'est pas seulement l'addition des compétences individuelles mais bien subordonnée au niveau de coopération de l'équipe. La performance de l'équipe devient alors supérieure à celle de la majorité de ces membres voire parfois même supérieure à celle du plus compétent. Par exemple, nous privilégions les activités d'enquête ou d'hackathon lors desquelles les novices doivent résoudre une situation problème en un temps réduit. Toute la difficulté de notre travail de conception est alors de planifier des successions de tâches en décalage optimal avec les ressources des novices, porteuses de sens car en phase avec leurs préoccupations préprofessionnelles et réalisables dans le temps imparti pour maintenir la motivation à apprendre ensemble. Dès lors, les formateurs sont eux-mêmes confrontés à la nécessité de travailler en équipe pour “enclencher un processus de design pédagogique” (Sartori, 2011) précis, cohérent et innovant, passant par cinq phases : Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation (ADDIE). Lanarès et al. (2023) soulignent dans leur ouvrage l'importance d'explicitier aux formés cette cohérence entre le contexte d'enseignement, la stratégie d'enseignement, la stratégie d'évaluation, les objectifs et les contenus.

2. Évaluer les compétences de coopération

Dans cette logique de design pédagogique cohérent, les principes fondamentaux autour desquels l'équipe de formateurs s'est réunie sont les suivants : “on ne peut évaluer que ce qu'on enseigne” (Perrenoud, 2005) et “il faut communiquer explicitement ses attentes aux étudiants” (Lanarès, 2023). Il nous a paru crucial de cibler les compétences précises que nous voulions enseigner pour pouvoir mesurer leur degré d'acquisition chez les jeunes collègues. Il est apparu également important de déterminer des indicateurs clairs, les “traces” faisant preuves des compétences (Baker, 2008), qui permettent d'évaluer de manière ciblée et factuelle les acquis de chacun. En somme, c'est le creuset de cette évaluation qu'il nous a fallu déterminer. Très vite s'est imposée la nécessité d'évaluer de manière conjointe le produit du travail coopératif et le processus de coopération afin de rendre compte, non seulement du résultat du travail d'équipe, mais aussi et surtout du déroulement et des mécanismes sous-jacents de ce résultat. Cet effort, au final, a constitué davantage un enjeu de formation qu'un objectif d'évaluation, cette dernière représentant un outil plus qu'une fin en soi.

2.1. Une évaluation collective du processus et du produit de la coopération

Dans la dynamique d'évaluer les compétences développées par chacun en fin de parcours de formation, l'un de nos premiers enjeux est de fournir des repères de progressivité transparents et compréhensibles pour chaque compétence évaluée, de manière à ce que les novices puissent identifier ce qu'ils savent faire et ce qu'ils doivent encore travailler individuellement et collectivement. Il s'agit d'appliquer une

évaluation par contrat de confiance (Antibi, 2011) et d'expliciter les modalités d'évaluation et le but à atteindre. Même si les modalités d'évaluation diffèrent selon qu'il s'agit du processus ou du produit de la coopération, elles ont pour point commun d'être centrées sur l'équipe, sa dynamique, son organisation, sa communication et donc de privilégier le collectif à l'individu. *De facto*, les évaluations sont collectives et ne prennent pas en considération les apports individuels de chaque membre du groupe. Ce que nous cherchons à évaluer, c'est bien le processus de coopération de l'équipe, ses réussites, ses errances parfois, mais surtout sa capacité à s'auto-réguler, à dépasser les points de vue divergents, à s'appuyer sur les forces de chacun pour construire une intelligence collective plus efficace mise au service du produit de la coopération, c'est-à-dire des traces que l'activité induit. En fin de parcours (à chaque fin de semestre), nous mettons ainsi les étudiants face à une tâche complexe contextualisée en EPLE, nous leur fournissons par exemple le dossier d'un établissement scolaire dans lequel se trouvent des bulletins réels d'élèves, le projet d'établissement, des relevés d'absences et de retards, des profils d'élèves à besoins éducatifs particuliers et une question problématique portant sur l'absentéisme, le décrochage scolaire, le harcèlement scolaire, l'éloignement culturel...etc. Ils doivent répondre en proposant un projet collectif, sur une durée longue, en général une journée, à l'issue de laquelle ils présentent le fruit de leur travail, à l'oral, devant un jury pluridisciplinaire constitués de formateurs, chefs d'établissements, CPE et/ou enseignants en poste.

Évaluer le produit de la coopération

L'évaluation du produit de la coopération a donc lieu lors de l'oral collectif qui clôt le parcours semestriel. Il s'agit pour les jurys constitués de différents professionnels du champ de l'éducation, de positionner les équipes dans un niveau de maîtrise pour chaque compétence évaluée (photographie 4). Nous constituons des jurys de trois personnes, avec l'idée de proposer une pluralité de regards et de points de vue. Les jurys venant de contextes distincts et occupant de fonctions différentes mais complémentaires, il est bien évidemment nécessaire d'harmoniser le positionnement des équipes à l'aide des repères de progressivité de la grille. Notre travail d'élaboration de ces repères de progressivité a donc constitué un temps clé dans la conception de cette approche par compétences afin de mettre en évidence les étapes par lesquelles pouvaient passer les équipes dans leur formation tout en restant réaliste sur leur atteinte. Notons que nos objectifs de formation se situent aux niveaux satisfaisant (bleu) et très satisfaisant (vert) ; que le jury situe d'abord l'équipe par rapport aux items bleus afin d'estimer le niveau dit "satisfaisant", preuve de ce que l'on peut raisonnablement attendre en Master, puis envisage les niveaux supérieurs et inférieurs pour affiner son jugement. Outre le fait que les étudiants connaissent et manipulent ces indicateurs tout au long du semestre, le jury reçoit ces éléments et indications en amont également et bénéficient d'une formation à distance à l'aide d'une vidéo d'une équipe des années antérieures. Ils positionnent la production puis échangent avec les formateurs quant à l'évaluation qui avait été réalisée l'année précédente ? Cela leur permet de se situer aussi sur leur compétence de jury. Cette formation, le fait d'être plusieurs jurys, évaluer plusieurs équipes successivement et évaluer par compétences et non en note sont autant de choix qui limitent "la constante macabre" (Antibi, 2003) et la subjectivité.

Photographie 4 : Grille du produit de la coopération

NSRF Institut national supérieur du professorat et de l'éducation Académie de Limoges

Pôle culture métier commune

GRILLE D'ÉVALUATION DU PRODUIT DE COOPERATION DES ÉQUIPES

	0	1	2	3
ACTEUR DU SERVICE PUBLIC				
Construire un discours et une pratique valorisant les élèves	La question de la valorisation des élèves est totalement omise ou implicite	La valorisation des élèves est annoncée, affichée sans propositions concrètes	La valorisation des élèves est effective	La valorisation des élèves constitue le fondement explicite du projet présenté
Concevoir un projet qui contribue à prévenir et à gérer tout signe de grande difficulté pour accorder à tous les élèves l'attention et l'accompagnement appropriés.	Le projet traite d'élèves génériques, virtuels et l'accompagnement proposé est créative ou infaisable	Le projet s'adresse à des élèves décrits de manière globale et l'accompagnement proposé est ciblé sans lien direct avec les besoins et le contexte	Le projet s'adresse à des élèves décrits au regard de leurs ressources et de leurs besoins ; l'accompagnement est ciblé aux besoins ou au contexte	Le projet s'adresse à des élèves caractérisés de manière fine selon différentes ressources et hypothèses explicites ; l'accompagnement est adapté aux besoins et au contexte
Repérer les difficultés des élèves de la classe afin de mieux assurer la progression des apprentissages	Des difficultés sont annoncées sans lien direct avec des acquisitions visées et les processus d'apprentissage pour y parvenir sont absents du discours	Des difficultés sont repérées en lien avec des acquisitions visées. Les processus d'apprentissage sont vus de manière globale et linéaire	Des difficultés sont repérées et hiérarchisées en lien avec des acquisitions visées. Les processus d'apprentissage sont abordés de manière progressive	Des difficultés sont ciblées et hiérarchisées en lien avec des acquisitions visées. Les processus d'apprentissage sont vus de manière claire et avec la notion de progressivité
PÉDAGOGUE ET ENSEIGNANT AU SERVICE DE LA RÉUSSITE DE TOUS, EXPERT DES APPRENTISSAGES				
Inscrire l'évaluation des progrès et des acquis des élèves de la classe dans une perspective de réussite de leur projet d'orientation	La question de l'évaluation des élèves est omise ou juste affichée sans proposition	La question de l'évaluation des élèves par rapport au projet est abordée de façon globale	La question de l'évaluation des élèves par rapport au projet est abordée de façon précise avec des indicateurs pertinents	La question de l'évaluation des élèves par rapport au projet est abordée de façon précise avec des indicateurs pertinents et mise en lien avec le parcours de formation des élèves
Favoriser l'intégration de compétences transversales (créativité, responsabilité, collaboration) et le transfert des apprentissages par des démarches appropriées pour la classe	La question des compétences transversales des élèves n'est pas abordée	L'impact du projet sur la construction de compétences transversales est abordé	L'impact du projet sur la construction de compétences transversales est ciblé et mis en lien avec les TO et le contexte	L'impact du projet sur la construction de compétences transversales constitue le fondement du projet en lien avec le contexte et les TO
ACTEUR DE LA COMMUNAUTÉ ÉDUCATIVE				
Inscrire son intervention dans le cadre collectif du système éducatif : Identifier le travail possible avec des partenaires internes/externes diversifiés (équipes, parents, canopé, Onisep...)	Les partenaires convoqués le sont de manière formelle ou erronée	Des partenaires judicieux sont convoqués au sein du projet mais sans lien entre eux ni précision sur leur rôle	Des partenaires judicieux sont convoqués au sein du projet avec des précisions sur leur rôle	Des partenaires judicieux sont convoqués au sein du projet en lien entre eux et avec des précisions concernant leur rôle
Inscrire son action dans le cadre d'un projet d'établissement et des enjeux du système scolaire	Le contexte et/ou la connaissance du système scolaire sont abordés de manière formelle et déconnectés du projet	Certains éléments du contexte et des attentes du système scolaire sont convoqués pour justifier le projet	Le projet prend appui sur quelques éléments pertinents du contexte et une connaissance satisfaisante du système scolaire	Le projet prend appui sur des éléments multiples et pertinents du contexte et une connaissance approfondie du système scolaire

Évaluer le processus coopératif

Pour évaluer le processus coopératif, l'équipe de formateurs adopte une posture d'observateur silencieux puis mène des entretiens avec les membres de l'équipe. Pendant ces différents temps l'évaluateur observe le fonctionnement de l'équipe puis la positionne dans les niveaux de maîtrise des habiletés coopératives (figure 2).

Un des aspects les plus intéressants de cette évaluation par l'observation concerne les opérations cognitives langagières (figure 3) qui constituent des traces tangibles de l'apprentissage coopératif (Baker, Ibid), à la fois sur les compétences de communication mais aussi sur toutes les autres compétences évaluées. Plus une équipe construit ses discussions sur des interactions de haut niveau, plus elle fait preuve de ses compétences de coopération lors de la construction de leur projet. Céline Buchs précise à ce sujet en 2011 qu'il s'agit de "stimuler des interactions sociales constructives dans les groupes de travail pour optimiser la qualité du travail de groupe et des apprentissages qui en résultent". Pour les stimuler il est alors important de les annoncer comme évaluées puis de proposer des situations où elles peuvent être exercées et de les faire auto-évaluer régulièrement.

Figure 3 : Les opérations cognitives langagières, “traces” d'apprentissages coopératifs

Repérage des « opérations cognitives-langagières » *** qui représentent les « traces » d'apprentissage								
A			B			C		
Discussion hors de propos	Discussion conflictuelle pour défendre sa propre opinion sans rechercher le compromis Éventuellement expression de frustration, agressivité...	Absence de discussion <i>Personne ne parle</i>	Lecture à voix haute des consignes avant de commencer l'activité ou pour la réorienter	Partage d'informations, sans effort pour aller plus loin dans le raisonnement, sans justification	Discussion procédurale, portant sur ce qui a trait à la préparation de la production finale <i>Plan, parties, répartition parole, outils de présentation...</i>	Discussion métacognitive sur le fonctionnement du groupe pour constater et/ou réguler	Discussion de haut niveau sur les ressources <i>Reprise d'informations fournies par les documents à disposition = inférences logiques</i>	Discussion inférentielle de haut niveau sur les idées <i>Les arguments vont au-delà de ceux fournis par les documents à disposition = inférences pragmatiques</i>
X		X	X	X	X	X	X	X

Les diverses façons d'élaborer une connaissance ou un projet peuvent aussi être classées en quatre ensembles d'opérations cognitives-langagières (Baker, 1994, 1995 ; Mephu-Nguifo, Baker & Dillenbourg, 1999) :

- 1) les opérations d'expansion : il s'agit d'ajouter une information, une précision, de généraliser un propos, d'inférer une nouvelle proposition ;
- 2) les opérations de contraction : elles sont l'inverse des opérations d'expansion : réduction de l'information, restriction du propos à une classe plus restreinte ;
- 3) les opérations d'étayage : il s'agit d'établir un lien entre la proposition exprimée et d'autres propositions, afin de vérifier, justifier, expliquer, critiquer, la première ; dans le cas d'un conflit verbal, ces opérations peuvent devenir argumentatives ;
- 4) les opérations de reformulation : la proposition est reprise de façon largement inchangée sur le plan des contenus, mais transformée dans son expression langagière ; parmi ces opérations il y a également la tentative de proposer une synthèse globale de la co-élaboration précédente, sur laquelle les interlocuteurs peuvent expliciter la nature de leur accord (voir les lignes 117-119 dans l'encart 1).

L'observation et la collecte des opérations cognitives-langagières permet d'évaluer d'une manière claire la communication des équipes mais elle éclaire également les autres compétences de coopération, notamment concernant l'organisation et la réflexion qui font l'objet d'une double évaluation. En effet, les enseignants et CPE novices s'auto-évaluent avant de confronter leur point de vue à celui de leur évaluateur.

2.2. Des moments d'auto-positionnement

Tout au long du parcours de formation, nous proposons aux enseignants et CPE novices des outils d'auto-évaluation, des grilles d'auto-positionnement, afin qu'ils puissent identifier leurs compétences individuelles et collectives. L'enjeu est essentiellement formatif - ces grilles ne sont ni collectées, ni évaluées - et permettent à chacun de connaître ses forces et ses fragilités. Elles sont proposées après chaque étape du parcours de formation, après chaque activité complexe proposant un terrain inédit dans lequel peuvent s'exercer ces mêmes compétences.

Pour se co-évaluer

Les temps de co-évaluation permettent une analyse réflexive collective autour du fonctionnement du groupe. Chacun peut ainsi faire part de son sentiment, mettre à plat des dysfonctionnements et proposer des remédiations propices à améliorer les compétences coopératives de l'équipe (photographies 5 et 6).

Photographie 5 : temps d'auto et co-évaluation en équipe

INSP Institut national
 Supérieur de l'Éducation
 et de la Formation pour
 l'Académie de Limoges

Pôle Culture Métier Commune

Grille d'auto positionnement collectif des compétences de coopération
 Complétez la grille et indiquez votre degré d'accord (0 = pas du tout, 5 = tout à fait d'accord)

Groupe : **6**

Répartition des rôles :

Chef de projet : **Chahide**

Porte-parole : **Lucie**

Secrétaire : **Justi** **Annaouk**

Chercheur numérique : **Nathia**

Le gardien du temps : **Thomas**

Organisation du travail
 5
 4
 3
 2
 1
 0

Communication dans le groupe 0

Réflexion 0

Communiquer	(1 à 5)
Les prises de parole ont été respectueuses (poser sa voix sans agressivité, ajuster les temps et tours de parole...)	5
La formulation des messages a été efficace (Confronter ses idées à celles des autres membres du groupe, reformuler les idées proposées, accueillir les idées des autres...)	5
L'écoute dans le groupe a été pertinente (Savoir écouter une idée, ne pas couper la parole, les participants se regardent, sans être sur leur téléphone ou ordinateur...)	4
Réfléchir	(1 à 5)
La situation de travail a bien été contextualisée (de quoi s'agit-il ? Pour quel objectif ? A quelle échéance ? etc.)	5
Les ressources (humaines et/ou documentaires) ont fait l'objet de recherches pertinentes et complètes par rapport à la situation de travail proposée	5
Les choix faits par l'équipe ont été argumentés et partagés par l'ensemble du groupe	5
La prise de décision a été efficace (construire l'activité en lui donnant du sens, lister les étapes et hiérarchiser les tâches)	3
Organiser	(1 à 5)
Les rôles attribués ont été respectés	4
Les tâches ont été réparties, chacun a fait sa part du travail	5
Le temps donné pour l'activité a été bien réparti	3,5
Au besoin, la stratégie de travail a été adaptée de façon efficace (s'autoévaluer, réorienter les tâches, réguler les conflits)	5

Photographie 6 : grille de Co-évaluation en équipe



Pour s'auto-évaluer

Chaque enseignant et CPE novice a l'opportunité de s'emparer de la grille d'auto-positionnement individuel (photographie 7) pour apprendre à se connaître et à identifier ses habiletés et compétences coopératives. A partir de cette grille, les discussions permettent un véritable retour réflexif individuel propre au développement de gestes professionnels liés à la coopération en équipe, qu'il s'agisse d'échanges formalisés avec les autres membres de l'équipe ou avec un des formateurs, ou d'échanges informels avec les autres novices quels que soient leurs parcours de formation.

Photographie 7 : Grille d'auto-positionnement individuel des compétences de coopération

Grille d'auto positionnement individuel des compétences de coopération

Complétez la grille et indiquez votre degré d'accord (0 = pas du tout, 5 = tout à fait d'accord)

Nom : _____ Groupe : _____
Prénom : _____ Rôle tenu : _____

Communiquer	(1 à 5)
J'ai parlé, en posant ma voix, en étant respectueux	
J'ai su écouter les idées des autres (ne pas couper la parole, regarder et écouter les autres, ne pas être sur mon téléphone).	
J'ai formulé des messages (en confrontant mes idées à celles des autres membres du groupe, en reformulant les idées proposées)	
Réfléchir	(1 à 5)
J'ai contribué à la contextualisation de la situation proposée (de quoi s'agit-il ? Pour quel objectif ? A quelle échéance ?)	
J'ai contribué à la prise des décisions (construire l'activité en lui donnant du sens, lister les étapes et hiérarchiser les tâches)	
J'ai contribué à la recherche et aux choix des ressources	
S'organiser	(1 à 5)
J'ai endossé mon rôle au sein de l'équipe	
J'ai fait ma part de travail	
J'ai apporté mon aide au besoin	

Organisation du travail

5
4
3
2
1
0

Communication dans le groupe Réflexion

Conclusion : évaluer la pertinence d'une formation à la coopération au cours de la formation initiale des enseignants et CPE novices.

Apprendre à coopérer : un défi pour les formés

Communiquer, gérer des conflits, accepter l'avis de l'autre, savoir écouter, savoir faire preuve d'empathie... autant de compétences qui s'apprennent individuellement mais dans et par le groupe. Sans le groupe ces compétences ne sont ni enseignables, ni observables et encore moins évaluables, or, la formation initiale continue à évaluer majoritairement les individus isolément. Notre choix d'imposer une évaluation collective donnant lieu à une évaluation par compétences pour toute l'équipe (transformée par nécessité institutionnelle en une seule note) nous est apparu comme une évidence pour atteindre nos objectifs et, qui plus est lors d'un oral, toutefois il constitue un défi de taille pour les formés et l'institution. Ce positionnement, encore marginal, se heurte à des contestations teintées de représentations sur ce que doit être une évaluation. Représentations ancrées dans les habitudes sous

couvert de recherche d'une soi-disant justice ou d'égalité : quid de l'étudiant jugé brillant qui ne réussit pas à obtenir une note en équipe comparable à celles qu'il obtient seul en formation disciplinaire ? Quid du « passager clandestin » (Pfefferlé, 2018), membre le moins engagé du groupe, qui peut profiter des bonnes performances d'ensemble ? Quid enfin et à l'opposé, du « top performer » (ibid.) qui n'est pas forcément identifié et récompensé à sa juste valeur ? Face à ses obstacles nous retenons les résultats de plusieurs études menées sur les avantages de l'évaluation collective dont celle de Castel et al. (2015) qui souligne :

« alors que l'évaluation individuelle est généralement privilégiée, cette étude apporte des résultats empiriques à l'appui des recherches qui postulent que l'évaluation collective des équipes de travail est susceptible de renforcer la performance globale, en comparaison de l'évaluation individuelle de leurs membres, car elle favorise l'entraide et la régulation collective. Toutefois, ces résultats mettent en évidence que l'effet positif de l'évaluation collective en comparaison de l'évaluation individuelle n'est observé que lorsque les critères d'évaluation favorisent la régulation collective de la performance. »

Ces résultats viennent renforcer nos efforts pour clarifier les indicateurs observés et susciter la méta-analyse ; de plus nous cherchons à coupler systématiquement une formation collective favorisant l'apprentissage de la coopération à une formation plus personnelle pour développer les compétences psychosociales à travers la connaissance de soi et le développement de la confiance en soi.

Dans le cas de dispositifs de développement des habiletés sociales voici quelques thèmes abordés en formation que nous traversons trop rapidement et que nous pourrions développer davantage si les maquettes de formation le permettent en terme de volume horaire : perception et expression des émotions ; Théorie de l'esprit (TOM) ; Communication verbale et non-verbale ; Engagement et soutien d'une conversation ; Résolution de problème sociaux (faire une demande, apprendre à refuser, faire une critique, faire face à l'ironie et au harcèlement...) ; Contrôle de son irritabilité ; Compréhension de l'implicite ; Développement des relations amicales et réseaux sociaux ; Conventions et codes sociaux en situation professionnelle. Toutes ces thématiques favorables au renforcement des compétences psychosociales, elles-mêmes constitutives de la compétence à coopérer, apparaissent comme fondamentales dans la formation initiale des enseignants et CPE novices mais ne représentent finalement qu'une part congrue dans les maquettes de formation. Nous avons pu installer durablement depuis cinq ans un total de 125 heures dédiées au travail pluridisciplinaire et collectif sur les 800 heures de formation par étudiant sur deux ans. Toutefois, nous bénéficions de ce volume pour remplir de nombreux autres objectifs (préparation à l'oral, connaissance du système éducatif, droits et devoirs des personnels, politique éducative, ...) ce qui limite les temps consacrés au développement personnel d'une véritable posture professionnelle en acte. De plus,

« la reconnaissance de ses propres compétences va d'autant plus être influencée ou biaisée par divers facteurs internes tels que l'estime de soi ou le sentiment d'efficacité personnelle. Finalement, une des caractéristiques principales des compétences sociales étant donné qu'elles sont dynamiques, et donc qu'elles s'acquièrent sur le long terme, il va falloir être en mesure de

les évaluer de manière continue et progressive Cette démarche représente un défi supplémentaire » (Hubert & Denis, 2001).

Les formés sont donc confrontés en peu de temps à des injonctions non pas paradoxales mais parallèles : réussir un concours, un master, une insertion professionnelle en établissement et dans les interstices parvenir à amorcer la construction d'une identité professionnelle. C'est donc pourquoi nous persistons à croire en une formation rénovée dont la colonne vertébrale serait moins les savoirs que les savoirs être, pilotée par une évaluation collective par compétences et des formateurs formés à un design pédagogique innovant, eux-mêmes capables de travailler en équipe.

Apprendre à coopérer : un défi pour les formateurs

Enclencher et évaluer le processus de coopération c'est à la fois observer les habiletés sociales individuelles mais aussi leur mise en synergie au sein d'un collectif. Les repérer nécessite la formalisation et la manipulation fine d'indices verbaux et non verbaux mis en œuvre lors des échanges entre les membres d'une équipe. Pour ce faire, la présence active de formateurs référents capables de suivre des équipes et d'assurer ce repérage subtil a constitué à la fois un impératif et une limite. Il est apparu inévitable de recruter des formateurs déjà convaincus par l'importance et l'efficacité du processus coopératif, sensibilisés par leur expériences professionnelles et acculturés à travers des lectures. De plus, la formation des formateurs à l'usage des grilles d'évaluation par compétences constitue également une nécessité. Le tout peut alors devenir un obstacle de par son caractère chronophage et l'expertise demandée, qui plus est si le nombre d'étudiants est important. Notre chance ici fut de coordonner des promotions d'environ cent novices par promotion, ce qui demeure une formation à taille humaine. Évaluer le processus demande du temps en amont pour construire une culture commune entre formateurs et avec les formés, pendant la formation pour concevoir les activités et accompagner les novices et en aval pour les évaluer. Pour autant, cet aspect n'est pas ou peu pris en compte ni dans les volumes, ni dans les modalités de contrôle des maquettes de formation, ni même dans le pilotage des équipes de formation pour en faire une priorité du travail pédagogique.

Par ailleurs, entrer dans une stratégie d'enseignement coopérative couplée à une évaluation collective oblige à remettre en question ses démarches d'enseignement, à développer ses compétences et à clarifier ses intentions pédagogiques. Faire appel au "design pédagogique" consiste alors à s'interroger sur dix aspects spécifiques concernant les apprentissages des novices : Pourquoi apprennent-ils ? Vers quels buts apprennent-ils ? Qu'apprennent-ils ? Comment apprennent-ils ? Comment l'enseignant facilite-t-il l'apprentissage ? Avec quoi apprennent-ils ? Avec qui apprennent-ils ? Où apprennent-ils ? Quand apprennent-ils ? Comment mesurer la progression de l'apprentissage ?

Ceci sous-entend que les formateurs universitaires puissent bénéficier de temps de formation et de temps de travail collectif dédié à la pédagogie. Le paradoxe récurrent des dispositifs d'apprentissage coopératif se situe justement dans la difficulté à revoir son design pédagogique et interroge la posture des enseignants : savent-ils faire (une formation, un accompagnement et un savoir-faire peu développés), le veulent-ils (des valeurs orientées vers la coopération mais un investissement en temps trop important), le peuvent-ils ? (Buchs, 2020).

Construire une communauté d'apprentissage professionnels au profit des élèves (Yvon et Skopeltis, 2022), favorable au développement d'un véritable collectif, dépend principalement du contexte. Or, à ce stade de notre réflexion, la plupart des environnements de travail universitaires actuels ne sont ni pensés, ni conçus ni orientés par le travail d'équipe sur le plan pédagogique. Malgré des avancées notables, la pédagogie du supérieur demeure encore une réflexion soumise à des préoccupations majoritairement individuelles. Lalle souligne en 2019 que, s'il y a quelques années encore, la formation des enseignants universitaires à la pédagogie était inexistante, des centres d'appui à la pédagogie se créent maintenant dans le monde entier, quelle que soit la typologie des établissements, tandis qu'émerge la question de la valorisation de l'engagement pédagogique des enseignants. Mais pour le moment, alors que nous lançons les moteurs de recherche sur le concept "d'évaluation collective", force est de constater que les occurrences sont majoritairement liées au monde de l'entreprise et peu à celui de l'enseignement et encore moins dans le supérieur. Les expérimentations donnant lieu à des articles scientifiques n'ont pas lieu en France et aucune recherche à ce jour ne démontre le réinvestissement des compétences de coopération de la formation initiale vers la vie professionnelle en établissement. Il nous reste donc à poursuivre le travail, les convictions chevillées au corps.

Références

- Abrami, P., Ethier, C. (1996). *L'apprentissage coopératif : théories, méthodes et activités*. Montréal : Éditions de la Chenelière.
- Allal, L., Cardinet, J. & Perrenoud, P. (Ed.). (1979). *L'évaluation formative dans un enseignement différencié*. Berne : Peter Lang.
- Antibi, A. *La constante macabre ou comment a-t-on découragé des générations d'élèves*, éditions math'adore
- Antibi, A. *Évaluer par contrat de confiance*, in Cahiers pédagogiques n° 491, « Évaluer à l'heure des compétences », sept.-oct. 2011)
- Baker, M.J. (2008). *Formes et processus de la résolution de problèmes des savoirs aux pratiques éducatives*. In Y. Rouiller et K. Lehraus (Eds.) *Vers des apprentissages en coopération : rencontres et perspectives*, pp 107-130.
- Baines, E., Rubie-Davies, C., & Blatchford, P. (2009). *Improving pupil group work interaction and dialogue in primary classrooms: Results from a year-long intervention study*. *Cambridge Journal of Education*, 39 (1), 95–117.
- Baudrit, A. (2007). *Apprentissage coopératif/Apprentissage collaboratif : d'un comparatisme conventionnel à un comparatisme critique*. *Les Sciences de l'éducation - Pour l'Ère nouvelle*, 40, 115-136. <https://doi.org/10.3917/lsdle.401.0115>
- Buchs, C., Filippou, D., Quiamzade, A. et al., (2020). *L'apprentissage coopératif, un décalage entre enjeux pragmatiques et idéologiques*, dans B. Galand, M. Janosz (coord.), *Améliorer les pratiques en éducation. Qu'en dit la recherche ?* Louvain : Presses universitaires de Louvain, p. 34-44

Buchs, C. (2017). Apprendre ensemble : des pistes pour structurer les interactions en classe. In M. Giglio & F. Arcidiacono (Eds.), *Les interactions sociales en classe : réflexions et perspectives* (pp. 189-208). Berne : Peter Lang. ISBN : 978-3- 0343-2048-1

Buchs, C., Gilles, I. & Butera, F. (2011). Chapitre 14. Optimiser les interactions sociales lors d'un travail de groupe grâce à l'apprentissage coopératif. Dans : Étienne Bourgeois éd., *Apprendre et faire apprendre* (pp. 211-220). Paris cedex 14 : Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.brgeo.2011.01.0211>

Buhot, É. & Cosnefroy, L. (2011). *De la formation initiale à la première affectation, comment les professeurs des écoles perçoivent-ils leur développement professionnel ?* Les Sciences de l'éducation - Pour l'Ère nouvelle, 44, 17-39. <https://doi.org/10.3917/lsdle.441.0017>

Castel, D., Triplet, S., Monsellato, P. & Vallery, G. (2015). L'impact de l'évaluation collective ou individuelle des performances sur les équipes de travail : le cas d'une enseigne de restauration rapide et commerciale. *Relations industrielles / Industrial Relations*, 70(4), 718-740. <https://doi.org/10.7202/1034901ar>

Connac, S. (2018). *Impact de la coopération entre élèves sur leurs performances scolaires en 6e*. Les Sciences de l'éducation - Pour l'Ère nouvelle, 51, 11-42. <https://doi.org/10.3917/lsdle.514.0011>

Dameron, S. (2005). *La dualité du travail coopératif*. *Revue française de gestion*, no<(sup> 158), 105-120. <https://doi.org/10.3166/rfg.158.105-120>

Devillard, O. (2011). *La dynamique des équipes*. Editions Eyrolles.

Évangéliste-Perron, C., Sabourin, M. et Sinagra, C (1996). *Apprendre la démocratie : Guide de sensibilisation et de formation à la démocratie selon l'apprentissage coopératif*. Montréal, Les Éditions de la Chenelière, VIII-324 p.

Gather-Thurler, M., & Perrenoud, P. (2005). *Coopération entre enseignants : la formation initiale doit-elle devancer les pratiques ?* *Recherche & formation*, 49(1), 91-105.

Gather-Thurler, M. (1996). *Innovation et coopération entre enseignants : liens et limites*. In M. Bonami & M. Garant (Ed.), *Systèmes scolaires et pilotage de l'innovation : émergence et implantation du changement* (pp. 145-168). Bruxelles : De Boeck.

Gibert, A.F. (2018). *Le travail collectif enseignant, entre informel et institué*. Dossier de veille de l'IFÉ, n° 124, avril. Lyon : ENS de Lyon. <http://veille-et-analyses.ens-lyon.fr/DA/detailsDossier.php?parent=accueil&dossier=124&lang=fr>.

Hackman, J.R. (2011). *Collaborative intelligence: using teams to solve problems*. San Francisco, CA : Berrett-Koehler Publishers.

Hatchuel, A. (1996). *Coopération et conception collective : variété et crises des rapports de prescription*. *Coopération et conception*, G. de Terssac et E. Friedberg (eds), Octares Éditions, p. 101-122.

Hubert, S. & Denis, B. (2000). *Des outils pour évaluer les compétences transversales*. Actes du 1er Congrès des chercheurs en Éducation, 24-25 mai 2000, Bruxelles.

Johnson, D. W., Johnson, R. T., Holubec, E. J., & Roy, P. (1984). *Circles of Learning: Cooperation in the Classroom*. Association for Supervision and Curriculum Development.

Lalle, P. et Bonnafous, S. (2019). La révolution pédagogique de l'enseignement supérieur, une universalité géographique et paradigmatique. *Revue internationale d'éducation de Sèvres*, 80 | 49-60.

Lanarès, J., Laperrouza, M., Sylvestre E. (2023). *Design pédagogique* (1re éd.). Épistémé.

Lavergne, N. (1996). *L'apprentissage coopératif*. Québec français, (103), 26–29. L

Lapostolle G. (2013). *La création des Écoles supérieures du professorat et de l'éducation s'inscrit-elle dans un modèle supranational de professionnalisation des enseignants ?* Tréma, n° 40, pp. 60-75.

Le Boterf, G. (2018). *Développer et mettre en œuvre la compétence : Comment investir dans le professionnalisme et les compétences*. *Revue internationale de pédagogie de l'enseignement supérieur* [En ligne], 34(3) | 2018, mis en ligne le 20 novembre 2018, consulté le 20 septembre 2023. URL: <http://journals.openedition.org/ripes/1565>; DOI: <https://doi.org/10.4000/ripes.1565>

OMS (WHO), *Skills for health*. 2003, World Health Organization : Genève.

Perrenoud, P. (1993), *L'organisation, l'efficacité et le changement, réalités construites par les acteurs*. *Éducation & Recherche*, n° 2, pp. 197-217.

Perrenoud, Ph. (2005). *Compétences et évaluation Entretien avec Liliane Portelance*. *Formation et Profession*, vol. 11, n° 1, avril, 5-15.

Perrenoud, P. (2013). *Former des enseignants réflexifs : Obstacles et résistances*. De Boeck Supérieur. <https://doi.org/10.3917/dbu.altet.2013.01>

Sartori, A. (2011). Le design pédagogique et les modes d'interaction dans l'éducation à distance. *Distances et savoirs*, 9, 219-233. <https://www.cairn.info/revue--2011-2-page-219.htm>.

Viau, R. (1994). Compte rendu de [Vallerand, R. J. et Thill, E. E. (1993). *Introduction à la psychologie de la motivation*. Laval : Éditions Études Vivantes.] *Revue des sciences de l'éducation*, 20(2), 411–414. <https://doi.org/10.7202/031733ar>

Yvon, F. et Skopeltis, D. (2022). *CAP ou pas CAP ? Analyse d'un dispositif de collaboration*. *REE – Recherches en éducation*, 2022, n° 47, p. 11-23



**Les journées de
l'interdisciplinarité**

Transitions : une série de tableaux inspirés par les mathématiques

Transitions: a series of paintings inspired by mathematics

Stéphane VINATIER

XLIM UMR 7252 CNRS – Université de Limoges / IREM de Limoges
stephane.vinatier@unilim.fr

URL : <https://www.unilim.fr/journees-interdisciplinarite/777>

DOI : 10.25965/lji.777

Licence : CC BY-NC-SA 4.0 International

Résumé : Cet article présente une série de près de 200 tableaux du peintre Reg Alcorn, intitulée *Transitions* et produite depuis 2017, ainsi que les deux objets mathématiques qu'il utilise pour déterminer la structure des toiles de cette série, l'un ancien et l'autre plus récent, la tuile de Truchet et la spirale d'Ulam.

Mots clés : peinture, tuiles de Truchet, spirale d'Ulam

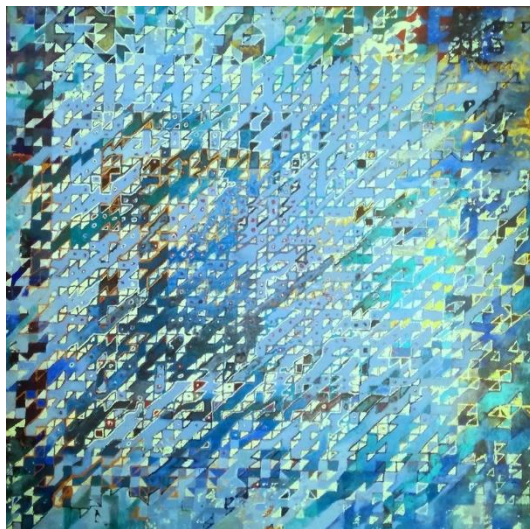
Abstract: This article presents a serial of around 200 paintings by the artist Reg Alcorn, produced from 2017 onwards and intitled *Transitions*, as well as the two mathematical objects involved in determining the geometry of these paintings, one old and the other more recent, Truchet tiles and Ulam's spiral.

Keywords: painting, Truchet tiles, Ulam's spiral

Introduction

La série *Transitions* comporte près de 200 œuvres peintes depuis 2017 par l'artiste Reg Alcorn. La Figure 1 montre un des tableaux de cette série.

Figure 1 : *Let All Blues Rejoice*, acrylique sur toile, 120 × 120 cm, Reg Alcorn (2019)



Crédits Reg Alcorn

Dans cet article, nous présentons les outils mathématiques utilisés par le peintre pour créer la structure de ses toiles et nous évoquons aussi, plus brièvement, son travail sur la couleur. Une version plus détaillée de ce travail, en particulier dans ses aspects mathématiques, a été proposée pour publication à une revue mathématique (Vinatier et Alcorn, 2023).

1. Au départ

Plusieurs collaborations entre l'IREM¹ de Limoges et l'artiste Reg Alcorn ont précédé la naissance de la série *Transitions*. Depuis toujours intéressé par les sciences, notamment par la chimie des pigments, Reg Alcorn était auparavant intervenu dans des actions de diffusion de la culture scientifique du CCSTI Récréasciences², qui l'a naturellement mis en contact avec l'IREM de Limoges lorsqu'il a voulu participer à la célébration, en 2012, du centenaire de la mort du grand mathématicien, physicien et philosophe Henri Poincaré. Des réunions préparatoires ont fait apparaître que 1912 était aussi l'année de naissance d'un des pères de l'informatique, Alan Turing, qui a aussi eu un rôle important dans la cryptanalyse de la machine ENIGMA utilisée par la marine allemande pendant la 2^e guerre mondiale. À noter que ces deux très grands savants se sont partagés un siècle, Turing étant décédé exactement 100 ans après la naissance de Poincaré. Une exposition *Poincaré / Turing (1854 – 1912 – 1954)* a été réalisée pour populariser certains de leurs travaux les plus importants, avec l'appui de grandes toiles peintes par Reg Alcorn.

¹ Institut de recherche sur l'enseignement des mathématiques, service commun de l'Université de Limoges

² L'un des quatre Centres de culture scientifique, technique et industrielle de la Nouvelle Aquitaine, basé à Limoges

Figure 2 : *Le petit déjeuner de Poincaré*, acrylique sur toile, Reg Alcorn



Crédits : IREM de Limoges

La collaboration a continué avec l'exposition *Convergences : les mathématiques dans l'histoire de l'art*, dans laquelle des tableaux réalisés par Reg Alcorn permettaient d'évoquer auprès de publics divers les liens entre mathématiques et histoire de l'art : les proportions (notamment le fameux nombre d'or), les pavages, la perspective, la géométrie dans l'art moderne. Puis avec la création et l'utilisation d'une *Camera Obscura* de grandes dimensions, grâce à l'appui de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université de Limoges qui a permis à deux de ses agents techniques, Jean-Marie Bonnetblanc et Bruno Demay, de concevoir, construire, déplacer et installer dans de nombreux lieux cette chambre noire, ancêtre très ancien de l'appareil photographique : placé à l'intérieur, les nombreux publics ont pu y vivre vivre des expériences sensorielles étonnantes tout en se familiarisant avec l'optique linéaire, les propriétés des symétries centrales, mais aussi le principe de la vision.

Figure 3 : Dodécaèdre étoilé (extrait d'un tableau de Reg Alcorn pour l'exposition *Convergences*) et vue de la technopole ESTER (Limoges) depuis la *Camera Obscura* de l'IREM de Limoges lors de la Fête de la Science 2017



Crédits : IREM de Limoges (tableau) et Stéphane Vinatier (photo)

Suite à ces expériences de diffusion de culture mathématique et scientifique, Reg Alcorn a été sollicité par le pôle Mathématiques, informatique, image du laboratoire XLIM pour illustrer les thèmes de travail de ses équipes de recherche, avec l'aide de l'IREM pour faire le lien entre les chercheurs et l'artiste. La Figure 4 reproduit le tableau évoquant l'optimisation.

Figure 4 : *Hilbert hotel*, acrylique sur toile, Reg Alcorn



Crédits : XLIM UMR 7252 CNRS – Université de Limoges

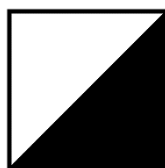
2. Ingrédients mathématiques

À la suite de nombreux artistes (Picasso, Mondrian, Kandinsky, Vasarely, Morellet...), Reg Alcorn cherche un procédé géométrique pour structurer les toiles de sa série *Transitions*. Il puise dans les objets mathématiques découverts lors des travaux précédents.

2.1. La tuile de Truchet

Le Révérend Père Sébastien Truchet (1657–1729) est un savant de l'époque de Louis XIV avec de nombreuses spécialités : mathématicien, typographe, « horloger, grand spécialiste des canaux, inventeur d'innombrables machines (canons, machines à transplanter les arbres, cadrans solaires, etc.) dont les fameux tableaux mécaniques de Marly » (André, 2002). Lors de l'inspection d'un canal du côté d'Orléans, il tombe sur une réserve de carreaux de carrelage carrés de deux couleurs, blanc et noir, séparées par la diagonale (voir Figure 5).

Figure 5 : tuile de Truchet



Il se demande alors quelles figures agréables peuvent être réalisées avec ce motif et entame une étude combinatoire qui donnera lieu à un mémoire de l'académie royale des sciences (Truchet, 1704), dans lequel il énumère toutes les dispositions possibles de deux tels carreaux : chacun d'eux peut prendre 4 orientations et le second peut être placé le long de n'importe lequel des 4 côtés du premier, ce qui donne 64 dispositions à priori, ramenées à 32 si l'on ne distingue pas les 2 carreaux, puis à 10 à rotation près (reprenant ce travail dans un article de l'*Encyclopédie*, Diderot proposera une dernière réduction à 4 dispositions, à inversion des couleurs et retournement de la figure près). Si l'objectif de Truchet est décoratif (il propose à la fin de son mémoire de nombreux pavages réalisés à partir des dispositions qu'il a listées), la rigueur et l'originalité de son étude combinatoire ont été soulignées :

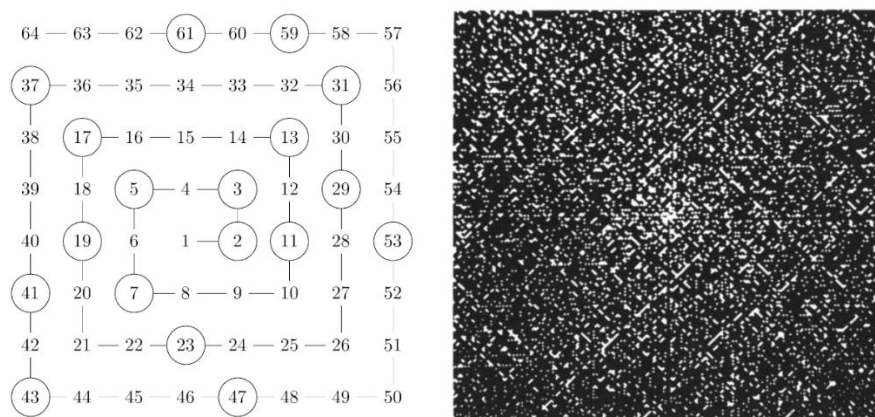
Truchet's treatise is of considerable importance for it is in essence a graphical treatment of combinatorics, a subject that, under the influence of Pascal, Fermat and Leibniz, was at the forefront of mathematics at the time. (Smith and Boucher, 1987, p. 377)

2.2. La spirale d'Ulam

Stanislaw Ulam (1909-1984) est un mathématicien d'origine polonaise. Émigré aux USA dans les années 30, il a rejoint le projet Manhattan de fabrication de la bombe atomique à Los Alamos en 1943 et contribué de façon essentielle au développement de la bombe H. Il a également établi de nombreux théorèmes dans plusieurs domaines de mathématiques fondamentales ou appliquées. L'un de ses apports à la théorie des nombres est la spirale qui porte son nom, dont la découverte est décrite comme suit dans un article de la revue grand public *Scientific American*.

Last fall Stanislaw M. Ulam of the Los Alamos Scientific Laboratory, attended a scientific meeting at which he found himself listening to what he describes as a "long and very boring paper." To pass the time he doodled a grid of horizontal and vertical lines on a sheet of paper. His first impulse was to compose some chess problems, then he changed his mind and began to number the intersections, starting near the center with 1 and moving out in a counterclockwise spiral. With no special end in view, he began circling all the prime numbers. To his surprise the primes seemed to have an uncanny tendency to crowd into straight lines. (Gardner, 1964, p. 122)

Figure 6 : spirales d'Ulam 8 x 8 (nombres premiers entourés) et 255 x 255 (nombres premiers en blanc)



Crédits photo : <https://www.jstor.org/stable/10.2307/24936050>

Pour surprenants qu'ils puissent paraître, les alignements de nombres premiers qui apparaissent dans la spirale d'Ulam trouvent une explication dans le grand nombre de valeurs premières distinctes prises par certaines fonctions polynomiales, ainsi que l'indiquent Ulam et ses co-auteurs (Stein, Ulam and Wells, 1964). Nous y reviendrons plus loin.

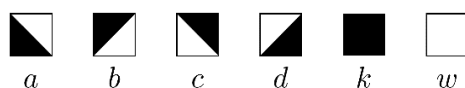
3. Le procédé de Reg Alcorn

Voyons maintenant comment l'artiste utilise ces deux notions mathématiques pour créer les tableaux de sa série *Transitions*.

3.1. Structure

Tout d'abord, il ajoute à la tuile de Truchet dans les 4 orientations possibles un carré noir et un carré blanc :

Figure 7 : les tuiles de Truchet complétées



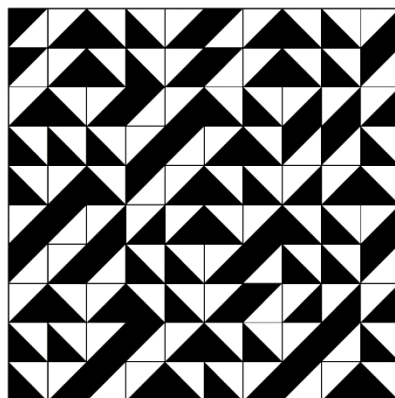
Il est pratique de représenter chaque tuile par une lettre, comme indiqué sur la Figure 7. Il choisit alors une séquence de ces tuiles, par exemple *daadb* et, plutôt que de la représenter en ligne :

Figure 8 : la séquence *daadb* en ligne



il l'enroule en spirale en suivant le procédé d'Ulam, autour de la première tuile de la séquence (ici *d*), en tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et en répétant la séquence jusqu'à remplir la surface disponible :

Figure 9 : la séquence *daadb* enroulée en spirale (20 répétitions)



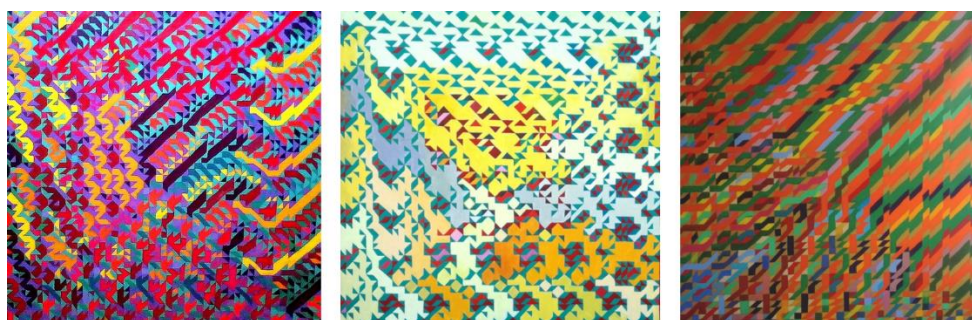
On découvre une structure qui, bien que totalement déterminée par la séquence choisie et le procédé d'enroulement en spirale, fait apparaître des motifs en grande partie imprévisibles (la longueur de la séquence a une influence importante sur les éventuelles symétries de la structure produite). Dès qu'il obtient un ensemble de motifs qui l'inspire, l'artiste prend la main sur les mathématiques et choisit les couleurs au fur et à mesure qu'il crée le tableau.

3.2. Couleurs

Le choix des couleurs est déterminant pour le résultat final. C'est le cœur du travail de Reg Alcorn dans cette série, pour lequel il puise dans son expertise de l'utilisation de la couleur et dans sa sensibilité artistique. Nous décrivons ici simplement les grandes lignes de ce travail sur la couleur.

Pour commencer, Reg Alcorn choisit deux couleurs qui se complètent bien, par exemple un rouge et un vert (le choix des types de pigments de chaque couleur a une grande importance pour le ressenti final, même si nous n'entrons pas dans ces considérations) et il attribue l'une des deux aux zones noires du motif, l'autre aux zones blanches. Bien sûr, les choses ne sont pas aussi binaires en art : bien souvent et selon son inspiration, une des deux couleurs sera remplacée par un mélange dans des proportions variables ou par une superposition des deux couleurs. De plus, au fur et à mesure du travail très minutieux (et très long) de peinture des motifs, d'autres couleurs vont émerger ici ou là, toujours selon l'inspiration de l'artiste, plus chaude à tel endroit pour souligner tel ou tel motif, plus froide ailleurs, et le tableau va progressivement apparaître sur la toile.

Figure 10 : les tableaux *Garden Raga*, *Golden orbweaver* et *Stripe breaks*, acrylique sur toile, Reg Alcorn



Crédits Reg Alcorn

L'effet visuel résultant de ces choix peut être tout à fait déconcertant : en taille réelle, les couleurs des différents motifs vibrent, se superposent, semblent produire des effets de perspective, se mélangent à une certaine distance du tableau, au point qu'il est parfois difficile de croire ce qu'on voit et même d'en détacher son regard...

3.3. Variations

Le procédé expliqué ci-dessus permet de faire apparaître une très grande quantité de motifs différents. Un « atlas de séquences » recensant ces motifs est d'ailleurs en préparation. Cependant Reg Alcorn a aussi exploré des variantes du procédé pour obtenir d'autres effets. Par exemple en créant des tableaux à plusieurs centres, avec une spirale enroulée autour de chacun ; ou encore en remplaçant la tuile carrée de Truchet par des tuiles rectangulaires dont les deux moitiés délimitées par une diagonale sont dans les proportions du triangle de Pythagore de côtés 3, 4 et 5 (voire en alternant les deux types de tuiles). Dans le premier cas, les tableaux ainsi construits peuvent prendre une connotation figurative, surtout s'ils comportent cinq centres pouvant évoquer les quatre membres et la tête d'un animal ou d'un être humain ; dans le deuxième cas, des formes plus lisses apparaissent aux contours des motifs, tandis que les lignes de la spirale, donc le procédé de construction, sont plus visibles.

4. Retour sur la spirale d'Ulam

Imaginons qu'on enroule en spirale des carrés de côté 1, dans lesquels sont inscrits les entiers naturels à partir de 1 au centre. À chaque fois qu'on arrive sur le carré d'un entier ($1 = 1^2$, $4 = 2^2$, $9 = 3^2$, $16 = 4^2 \dots$), la figure obtenue est elle-même un carré, dont 1 est le centre s'il s'agit du carré d'un nombre impair (se trouvant alors dans le coin en bas à droite) ou bien se situe juste en dessous du centre pour le carré d'un nombre pair (qui lui se trouve dans le coin supérieur gauche du carré).

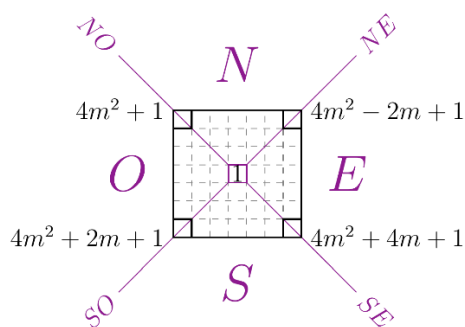
Figure 11 : les carrés dans la spirale d'Ulam

17	16	15	14	13
18	5	4	3	12
19	6	1	2	11
20	7	8	9	10
21	22	23	24	25

4.1. Repérage

La remarque précédente donne accès à la forme générale des coins du carré de côté impair $2m+1$, où m est un entier naturel, qui est donnée dans la Figure 12, où l'on fait apparaître de plus les directions de la rose des vents pour aider au repérage.

Figure 12 : les coins du carré de côté $2m+1$



Le coin inférieur droit contient l'entier $(2m + 1)^2 = 4m^2 + 4m + 1$, les formules pour les autres coins s'en déduisent facilement en remontant la spirale.

4.2. Formule d'Euler

La fonction polynomiale

$$E(n) = n^2 + n + 41$$

est connue depuis le mathématicien suisse Euler (1707 – 1783) par le fait très remarquable qu'elle prend 40 valeurs premières consécutives : les nombres $E(0) = 41$, $E(1) = 43$, $E(2) = 47$, ..., $E(39) = 1601$ sont tous des nombres premiers. Il a fallu attendre la fin du XX^e siècle pour que les mathématiciens Fung en 1988 puis Ruby en 1989 trouvent des polynômes prenant un plus grand nombre de valeurs premières

consécutives (respectivement 43 et 45, record actuel, voir Dress et Olivier, 1999, pour des détails). Ulam et ses co-auteurs ont également vérifié que la formule d'Euler prend 47,5 % de valeurs premières jusqu'à 10 000 000.

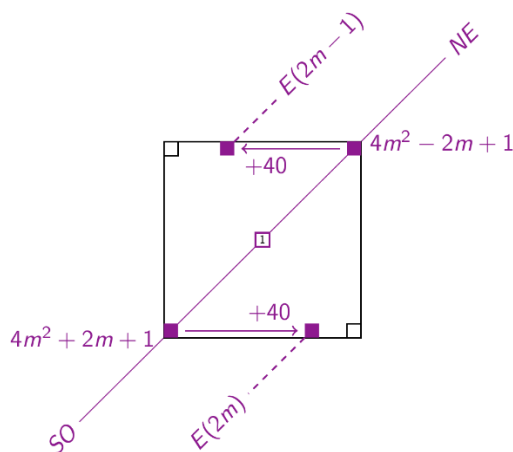
Or, les valeurs de la formule d'Euler aux entiers impairs et aux entiers pairs peuvent s'écrire comme suit :

$$E(2m - 1) = (4m^2 - 2m + 1) + 40$$

$$E(2m) = (4m^2 + 2m + 1) + 40$$

ce qui signifie que les valeurs de la formule d'Euler aux entiers impairs se trouvent, pour m assez grand, sur une parallèle à la demi-diagonale NE , tandis que celles aux entiers pairs sont sur une parallèle à la demi-diagonale SO , comme indiqué en Figure 13.

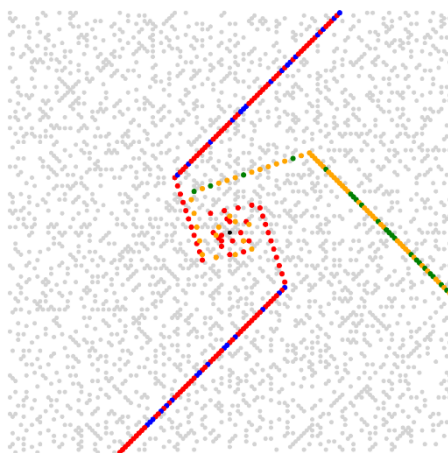
Figure 13 : les valeurs de la formule d'Euler aux entiers pairs et impairs dans la spirale d'Ulam



4.3. Ulam et Euler et ...

La Figure 14 montre les valeurs de la formule d'Euler dans la spirale d'Ulam, avec 1 au centre en noir, en gris les nombres premiers, en rouge les valeurs premières de $E(n)$, en bleu les autres valeurs, pour n jusqu'à 160.

Figure 14 : valeurs de polynômes dans la spirale d'Ulam



La Figure 14 fait également apparaître les valeurs d'un autre polynôme prenant un grand nombre de valeurs premières :

$$4n^2 + 4n + 59$$

pour n jusqu'à 80, avec les valeurs premières en orange, les autres en vert. On constate que les alignements visibles dans la spirale d'Ulam proviennent de certaines fonctions polynomiales prenant de nombreuses valeurs premières, l'orientation des alignements étant déterminé par la forme de ces fonctions. Ici on obtient des parallèles aux demi-diagonales NE et SO avec la formule d'Euler, à la demi-diagonale SE avec l'autre formule.

Même si les directions diagonales semblent prédominer sur la Figure 6, d'autres directions d'alignements sont possibles dans la spirale d'Ulam, notamment horizontales. Dans un article en préparation (Vinatier, 2023), on donne la forme générale des polynômes dont les valeurs forment des alignements dans la spirale. Cependant, la plupart d'entre eux ne prennent pas suffisamment de valeurs premières pour que ces alignements apparaissent dans la Figure 6. Réciproquement, de nombreuses fonctions polynomiales connues pour prendre un grand nombre de valeurs premières ne sont pas de cette forme et ne produisent donc pas d'alignements visibles... La représentation du plan à travers la spirale d'Ulam sélectionne visuellement certaines fonctions prenant un grand nombre de valeurs premières et laisse les autres dans l'ombre.

Références

André Jacques, 2002, "De Pacioli à Truchet : trois siècles de géométrie pour les caractères", 13^e colloque Inter-IREM d'épistémologie et histoire des mathématiques, sous la dir. de Jean-Pierre Escofier, 4000 ans d'histoire des mathématiques : les mathématiques dans la longue durée, IREM de Rennes.

Dress François et Olivier Michel, 1999, "Polynômes prenant des valeurs premières", *Experiment. Math.* 8.4, p. 319-338, issn: 1058-6458.

Gardner Martin, 1964, "Mathematical Games. The remarkable lore of the prime numbers", *Scientific American* 210.3 (mars 1964), p. 120-130.

Smith Cyril Stanley and Boucher Pauline, 1987, "The Tiling Patterns of Sebastien Truchet and the Topology of Structural Hierarchy", *Leonardo* 20.4, p. 373-385, issn: 0024094X.

Stein Myron L., Ulam Stanislaw M. and Wells Mark B., 1964, "Mathematical Notes: A Visual Display of Some Properties of the Distribution of Primes", *Amer. Math. Monthly* 71.5, p. 516-520, issn : 0002-9890, doi : 10.2307/2312588.

Truchet Sébastien, 1704, "Mémoire sur les combinaisons", *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, p. 363-372.

Vinatier Stéphane, 2023, Alignments in Ulam's spiralisation of the plane, *en préparation*.

Vinatier Stéphane et Alcorn Reg, 2023, "L'art dans l'histoire des maths : des objets mathématiques qui inspirent », *proposé pour publication*.



Les journées de
l'interdisciplinarité

Tétrazines et heptazines, les atouts des hétérocycles aromatiques à fort contenu d'azote

Tetrazines and heptazines, the advantages of high-
nitrogen content aromatic heterocycles

Pierre AUDEBERT

XLIM-ELITE, Université de Limoges

audebert@ppsm.ens-cachan.fr

URL : <https://www.unilim.fr/journees-interdisciplinarite/808>

DOI : 10.25965/lji.808

Licence : CC BY-NC-SA 4.0 International

Résumé : Les tétrazines sont des hétérocycles aromatiques stables contenant la plus forte proportion d'azote, relativement au carbone (composé générique $C_2H_2N_6$). Ces composés, pourtant connus depuis un siècle, ont pourtant émergé seulement au XXI^e siècle au niveau des applications les plus porteuses, la chimie click et la fluorescence ; nous présenterons quelques exemples et applications. Le cas des heptazines, un système tricyclique fusionné, même si un peu moins chargé en azote, (composé générique $C_6H_3N_7$) constitue pourtant un cas assez analogue, mais encore plus marqué. En effet, la synthèse des heptazines étant plus délicate, ces molécules, pourtant très prometteuses, ont pendant longtemps été quasi-oubliées car presque non accessibles. De récents travaux ont conduit à l'obtention de deux nouveaux dérivés fonctionnalisables, ouvrant la voie à la synthèse de nouvelles familles de ces composés, et de nouvelles applications en particulier en photocatalyse, en optoélectronique ou dans le développement de matériaux hybrides.

Mots clés : tétrazines, heptazines, fluorescence, photocatalyse

Abstract: Tetrazines are the stable aromatic heterocycles containing the highest proportion of nitrogen, relative to carbon (generic compound $C_2H_2N_6$). These compounds, although known for a century, only emerged in the 21st century with the most promising applications, click chemistry and fluorescence; we will present some examples and applications. The case of heptazines, a fused tricyclic system, even if slightly less loaded with nitrogen, (generic compound $C_6H_3N_7$) nevertheless constitutes a fairly similar, but even more marked case. Indeed, the synthesis of heptazines being more delicate, these molecules, although very promising, were for a long time almost forgotten because they were almost inaccessible. Recent work has led to the obtaining of two new functionalizable derivatives, opening the way to a large family of derivatives, and correlatively new applications in particular in photocatalysis, optoelectronics or in the development of hybrid materials.

Keywords: tetrazines, heptazines, fluorescence, photocatalysis

Introduction

Les hétérocycles aromatiques à fort contenu d'atomes d'azotes (1-3) sont des molécules tout à fait exceptionnelles en chimie en général, et en chimie hétérocyclique en particulier. En effet, l'atome d'azote est le seul atome capable (car il est trivalent !) de remplacer de manière strictement équivalente sur le plan des liaisons, un atome de carbone dans une structure aromatique classique, c'est-à-dire de type benzénique ou analogue supérieur (naphtalénique, anthracénique, etc...) Il existe bien des atomes différents (soufre, oxygène...) capable de contribuer à la formation d'hétérocycles aromatiques, mais dans le cas de ces atomes bivalents, les $4n + 2$ électrons dont le courant constitue le courant aromatique intrinsèque, doivent intégrer l'un des doublets disponibles de l'hétéroatome bivalent, ce qui conduit à des systèmes notablement différents de ceux carbonés, avec un atome de moins (cas du thiophène et du furanne par exemple) ou bien de l'apparition d'une charge positive sur le cycle (cas des pyriliums et analogues). Dans la première situation on parle de système « p-excédentaires » car le nombre d'atomes est inférieur d'une unité par hétéroatome impliqué à celui des doublets d'électrons impliqués dans l'aromaticité (6 électrons contre 5 atomes par exemple dans les cas les plus simples comme le thiophène et le furanne) et dans la deuxième on a donc affaire à des composés ioniques. Dans les deux cas la réactivité chimique tout comme les propriétés se trouvent profondément modifiées.

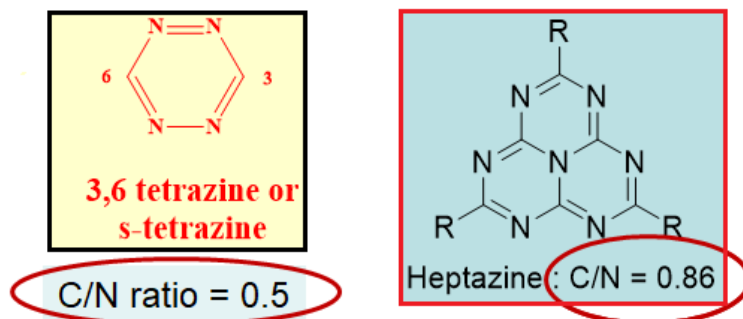
Pour revenir aux composés qui nous intéressent, c'est-à-dire les composés classiques, dans lesquels on a juste substitué un ou plusieurs atomes de carbone par les azotes, le caractère aromatique garde à peu la même structure (type benzénique au sens large), mais on observe cependant les changements suivants :

1. Le caractère électronégatif de l'azote change les niveaux d'énergie des orbitales (même si leur structure reste la même) et le caractère nucléophile disparaît rapidement au profit d'une inertie chimique au début, suivi de l'apparition d'un caractère électrophile (1) lorsque le nombre d'atomes d'azote augmente.
2. Du fait de ce même caractère électronégatif, les électrons sont plus liés aux atomes et l'énergie liée à l'aromaticité (indiquée Fig. 1) diminue progressivement avec le nombre d'atomes d'azote. (L'alternance C/N induit aussi une dissymétrie qui perturbe un peu le courant de cycle, ce qui influe dans le même sens)
3. Lorsqu'un nombre élevé d'atomes d'azote (rapport N/C supérieur à 1, l'orbitale HOMO peut être le mélange des doublets non-liants des azotes. Dans ce cas des propriétés inhabituelles comme la fluorescence peuvent apparaître. C'est le cas avec les tétrazines (1,2) qui vont nous intéresser.

Qui plus est, le remplacement d'un atome de carbone par un atome d'azote dans un hétérocycle « classique » est plus ou moins équivalent en terme d'affinité électronique, à l'introduction d'un groupe nitro sur ce même carbone. Cela signifie par exemple que la tétrazine possède (à peu près) la même affinité électronique que le tétranitrobenzène, ce qui peut se mesurer par exemple par des potentiels de réduction, qui sont directement liés au niveau de la LUMO, comparables.

Nous allons dans ce petit article, vous présenter les s-tétrazines et les heptazines, qui répondent aux formules génériques (Fig. 1) ci-dessous, en vous rapportant quelques propriétés frappantes et applications de ces hétérocycles fascinants.

Fig. 1 : Formules respectives des tétrazines et des heptazines, avec leur rapport C/N



1. Les s-tétrazines

Les s-tétrazines sont des molécules colorées (Fig. 3) alors que des cycles de cette taille ne le sont jamais (le benzène par exemple absorbe dans l'UV lointain). Cela est dû à une transition atypique entre la LUMO de la tétrazine (qui est comme classiquement la π^* du système aromatique) et la HOMO qui est (non-classiquement cette fois !) la combinaison des orbitales n des azotes adjacents. L'existence de cette orbitale anormalement haute a pour conséquence l'apparition d'une transition faiblement autorisée (elle apparaît à cause des oscillations du cycle, liées à la température, si le cycle était strictement plan elle serait interdite !) d'un coefficient d'absorption autour de 400-500 et qui est responsable de la couleur de la molécule. Indépendamment de la couleur, cette situation inédite dans un hétérocycle aussi petit, se double de l'apparition de la fluorescence, si et seulement l'orbitale de type n se trouve être la HOMO. En effet, cette orbitale est peu sensible aux effets de substituants, à l'inverse de l'orbitale π , qui, elle, y est fortement sensible. Le niveau de l'orbitale π descend de ce fait en dessous de celle n si des substituants suffisamment électroattracteurs, par exemple des chlores ou des alkoxy, sont présents. À l'inverse, les substituants donneurs tels que les amines, enrichissent le système π et font de ce dernier la HOMO. Cette fluorescence hautement atypique font de ces molécules les plus petits fluorophores organiques utilisables de la chimie, et je vais vous en exposer deux applications originales et remarquables, dans leur ordre historique.

a) Révélation des empreintes digitales directement fluorescentes.

Depuis le milieu des années 70, le mode de révélation des empreintes digitales repose sur l'évaporation d'un cyanoacrylate dans des conditions parfaitement contrôlées de température et d'hygrométrie. Tous les laboratoires de police du monde utilisent ce procédé qui permet la polymérisation du composé à la surface de l'empreinte, ce qui la rend apparente, en blanc.

C'est un procédé parfait pour les substrats colorés foncés. Sur les substrats clairs, la révélation est déjà plus délicate. Enfin, lorsque l'on considère les substrats blancs ou transparents, cela ne marche carrément pas, et il faut revenir à l'usage de poudres, sprays, etc... qui non seulement sont bien moins

efficaces, mais aussi abîment l’empreinte le plus souvent. Nous avons réussi à préparer une tétrazine (son nom est encore non publié hors brevet) qui s’évapore dans les mêmes conditions précisément que le cyanoacrylate, et qui a permis de préparer une « encre » (au nom commercial de Lumicyano TM) permettant de développer les empreintes digitales directement fluorescentes en une seule étape, comme le montre la figure 2 ci-dessous.

Fig. 2 : Développement d’une empreinte digitale, blanche avec un cyanoacrylate classique (à gauche) et directement fluorescente avec le Lumicyano TM à droite.

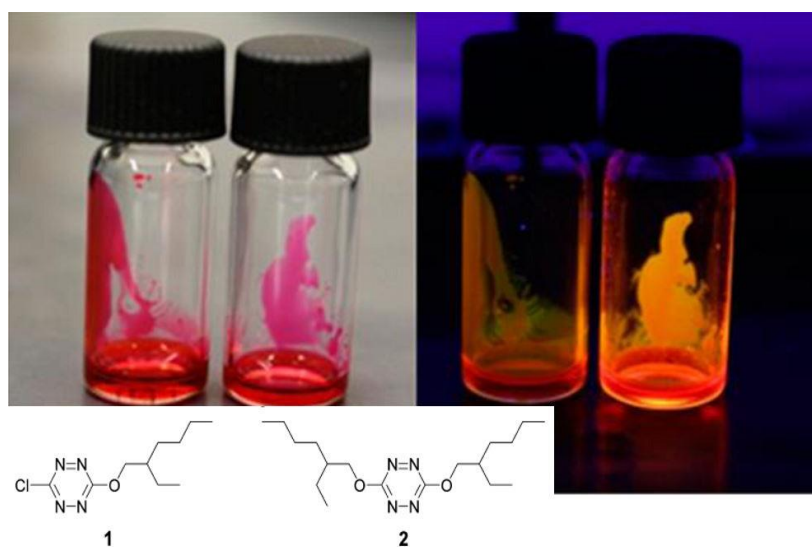


b) Liquides fluorescents de faible viscosité.

Les liquides organiques fluorescents existent, mais ils sont en général assez, voire très visqueux, du fait de la masse molaire importante, juste de l’unité fluorophore. En effet les seules stratégies existant à l’heure actuelle étant de substituer le cœur fluorescent par des chaînes « inductrices d’état liquide », la plus efficace étant la chaîne 2-éthylhexyle, mais cette approche montre ses limites avec quasiment tous les fluorophores, qui présentent une masse molaire élevée, ainsi que parfois des interactions dipôle-dipôle. Cela a permis de produire un certain nombre de fluides fluorescents, mais fréquemment leur viscosité était élevée ou très élevée, au mieux comparable au miel, et au pire au goudron.

Du fait de l’extrême petitesse, et du caractère faiblement polaire du noyau tétrazine, fluorescent, nous avons pu produire des tétrazines réellement liquides, la moins visqueuse présentant à peu près la viscosité de l’huile d’olive ! Voici sur la figure ci-dessous, les formules et photos de ces deux tétrazines.

Fig.3 : Formules et images (lumière visible et UV 360 nm, 1 flacon de droite et 2, flacon de gauche) des deux tétrazines liquides (formules en bas à gauche), qui sont les liquides organiques fluorescents les moins visqueux connus.



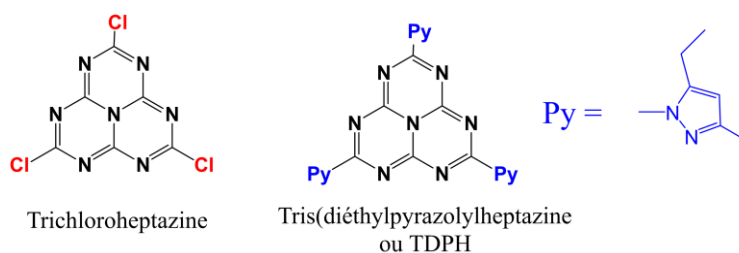
2. Les Heptazines

a) Introduction

Toujours dans la catégorie des hétérocycles à fort contenu d'azote, nous nous sommes donc également intéressés aux heptazines (3-5), dont le cœur (Fig. 1, droite) contient 7 atomes d'azote pour 6 de carbone. Le rapport C/N est plus élevé, mais en plus il n'y a pas d'atomes d'azote adjacents, ce qui empêche tout mélange des orbitales non liantes (n) des azotes. Dans ces conditions la transition optique de plus basse énergie est de type π - π^* , et la fluorescence également. Toutefois, une anomalie orbitale fait que ces mêmes orbitales ont un recouvrement quasi-nul, et de ce fait situe le triplet presque au même niveau, voire parfois au-dessus en énergie (dans certains cas d'heptazine dissymétriques), du singulet. Cette situation, également unique chez les fluorophores purement organiques, confère à ces molécules un caractère *intrinsèque* de fluorescence retardée (appelée TADF, pour Thermally Induced Delayed Fluorescence)

Jusqu'à l'an 2000, ces molécules étaient presque inconnues, car, mis à part de rares synthèses spécifiques, on ne connaissait pas de précurseurs d'intérêt général, et on étudiait plutôt des matériaux à base d'heptazines polymérisées (4). Cela dura jusqu'à ce que Kroke et al. en 2000 et Audebert et al., en 2019, ne publient les premières synthèses de la trichloroheptazine (3, 5) et de la TDPH (3) (Fig. 4 ci-dessous), qui furent les deux premières seules heptazines publiées à groupements échangeables.

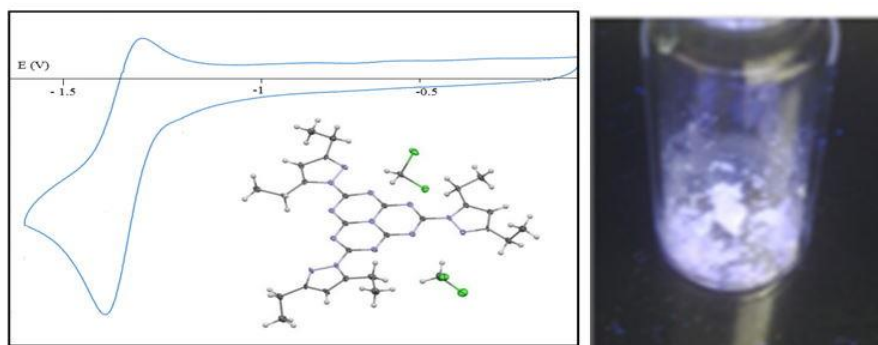
Fig. 4 : Formules de la trichloroheptazine et de la TDPH.



b) Caractère électrodéficientaire et fluorescence retardée.

Les heptazines présentent en général une électrochimie réversible, comme la TDPH (Fig. 5) associée à un gap optique dans le bleu ou bien le violet (3). L'association de ces deux propriétés leur confèrent des propriétés très intéressantes en photocatalyse. En effet le potentiel rédox d'oxydation des heptazines à l'état excité s'obtient en additionnant le potentiel de réduction (qui est corrélé à l'énergie de la LUMO) et le gap optique. Avec un potentiel de réduction de -1.25 V (Fig. 5) et un gap optique proche de + 2,8 V, cela fait pour la TDPH un potentiel rédox de + 1.55 V (ref Calomel), soit nettement supérieur à l'oxydation de l'eau (1.23 V vs ENH, cad + 1 vs calomel, à pH 0)

Fig 5 : Voltamétrie cyclique de réduction, structure cristalline (à gauche) et fluorescence (à droite) de la TDPH.



Des expériences de photocatalyse (génération de carbocations par oxydation sélective de thiols) ont déjà été couronnées de succès et fait l'objet d'une publication (6).

Conclusion

Ce petit synopsis des propriétés et applications des tétrazines et des heptazines vous aura, j'espère, convaincu des propriétés extraordinaires des hétérocycles à fort contenu d'azote en fluorescence et en catalyse. Ces molécules ont en effet un caractère électrodéficientaire exceptionnel, associés dans ces cas particuliers à une structure orbitalaire unique et génératrice de propriétés jamais rencontrées chez les fluorophores organiques au sens strict (seulement, et assez rarement, dans des complexes organométalliques). Je ne l'avais pas encore signalé, mais un avantage supplémentaire est la synthèse à des échelles assez importantes (quelques grammes) de tous les précurseurs. Cela en fait donc des cibles de choix, et nous continuons de travailler sur ces molécules remarquables, dans le cadre des objectifs précédemment exposés dans cet article.

Références

- 1) P. AUDEBERT and G. CLAVIER, *Chem. Rev*, 2010
- 2) P. AUDEBERT et F. MIOMANDRE, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* 44 (2020) 100372
- 3) P. AUDEBERT, E. KROKE, C. POSERN et S. H. LEE, *Chem. Rev*, 2021, 121, 2515–2544
- 4) S. KUMAR, N. SHARMA et K. KAILASAM, K., *Journal of Materials Chemistry A* 2018, 6 (44), 21719-21728.
- 5) A. SCHWARZER, T. SAPLINOVA et E. KROKE, Schwarzer, A.; Saplinova, T.; Kroke, E. *Coordination Chemistry Reviews* **2013**, 257 (13-14), 2032-2062.
- 6) L. GALMICHE, C. ALLAIN, G. MASSON, T. LE et P. AUDEBERT, *Chem. Commun*, 2020, 56, 10742.