



LIVRE BLANC

Comment choisir les bons outils numériques
adaptés aux apprentissages ?

Cas d'usage en photonique



PRÉFACE



Depuis quelques années, la formation professionnelle connaît de profondes évolutions. Les professionnels recherchent aujourd'hui des compétences et des connaissances directement mobilisables dans leur activité quotidienne. Former au bon niveau, avec des objectifs pédagogiques adaptés, constitue un enjeu important pour les filières industrielles, et notamment pour la filière photonique.

Parallèlement, les évolutions technologiques et numériques ouvrent de nouvelles perspectives dans la manière de concevoir et de mettre en œuvre la formation. Les outils numériques offrent des possibilités inédites pour enrichir les pratiques pédagogiques et faciliter l'acquisition de compétences techniques.

En tant qu'acteur de la formation professionnelle dans le domaine de la photonique, PYLA, centre de formation d'ALPhANOV, est particulièrement fier d'avoir contribué au projet PhOENIX. Ce projet nous a permis de poursuivre le développement d'outils pédagogiques numériques innovants, en collaboration avec des partenaires clés, afin d'en garantir la pertinence et l'efficacité. Ces travaux visent ainsi à soutenir le développement des compétences dans toute la filière photonique, au service des industriels comme des acteurs de la formation initiale et continue.

Ludovic LESCIEUX - Responsable de PYLA, centre de formation d'ALPhANOV

« Aujourd'hui, la transformation numérique place la formation au cœur d'un enjeu majeur : former mieux, plus vite et en toute sécurité. Mais intégrer le numérique ne se résume pas à installer de nouveaux outils technologiques. Cela exige une réflexion stratégique : quels savoirs transmettre, à qui, dans quel objectif pédagogique et pour répondre à quelles attentes des apprenants et des formateurs ?

Mal choisie ou mal employée, une technologie peut s'avérer contre-productive. À l'inverse, intégrée au bon moment du parcours, elle devient un levier de performance exceptionnel. C'est pour répondre à ces défis que l'équipe Systèmes Centrés sur l'Humain (SCH) du CATIE s'est mobilisée dans le cadre de PhOENIX. En combinant analyse des comportements humains et maîtrise technologique, nous concevons des dispositifs adaptés aux capacités cognitives des apprenants et aux contraintes de leur environnement.

À travers ce livre blanc, nous partageons les enseignements tirés de nos travaux ainsi que les méthodes que nous avons développées. Nous souhaitons proposer aux acteurs de la formation et aux entreprises un accès simplifié et opérationnel à ces «briques méthodologiques» concrètes. Notre ambition est claire : vous accompagner dans l'optimisation de vos parcours pédagogiques pour un développement véritablement centrés sur l'humain. »

Florian LARRUE - Responsable du département Systèmes Centrés sur l'Humain - CATIE



« Photonics France agit depuis sa création pour le développement et la promotion des formations adaptées aux besoins de la filière photonique. Ceci en lien étroit avec son réseau d'adhérents, industriels utilisateurs quotidiens de la formation initiale et continue, et ses partenaires institutionnels : ministères de l'Education nationale, du Travail et de l'Emploi, les rectorats et les régions, l'UIMM, et OPCO et le MEDEF.

Rejoindre le projet PhOENIX était une poursuite naturelle de notre action. L'étude et le développement d'outils pédagogiques numériques permet d'adapter les formations aux public scolaire actuels tout en optimisant leur coût et délai de mise en place. Ils tendent à préparer les élèves au geste professionnel en adoptant une démarche pédagogique nouvelle. De l'opérateur à l'ingénieur, les besoins sont estimés à plusieurs milliers d'emplois par an dans notre filière dont la croissance annuelle est de 10 % ».

Ivan TESTART - Directeur Général de Photonics France



SOMMAIRE

INTRODUCTION

6

A qui s'adresse ce livre blanc ?	7
Les partenaires du projet	8
Le projet PhOENIX	10

MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DES SOLUTIONS NUMÉRIQUES

13

Planifier - Rechercher - Concevoir - Développer et contrôler - Tester	15
Accessibilité des formations	17

OUTILS NUMÉRIQUES - RÉALITÉ VIRTUELLE

19

L'Immersive Photonics Lab	20
Pourquoi utiliser la réalité virtuelle ?	22
Comment construire pédagogiquement un TP en VR ?	23
Code informatique : les enjeux techniques	25
Contraintes et limites	28

OUTILS NUMÉRIQUES - VIDÉOS PÉDAGOGIQUES

30

Introduction	31
Différents médiums pour différents usages	32

MATHS4PHOTONICS - EXERCISEUR DE REMISE À NIVEAU EN MATHÉMATIQUES

37

Un outil qui s'appuie sur l'existant	38
Un exerciceur dédié aux mathématiques pour la photonique	39
Actions dans le cadre du projet	39
Résultats	42
Quelques conseils pour un projet de ce type de projet	44
Adaptative learning	45

ÉVALUER ET VALIDER DES OUTILS DE FORMATION

47

L'analyse experte	48
L'évaluation UX	49
L'évaluation d'impact	50
Résultats du projet	51

CONCLUSION

52

LES RESSOURCES

54



INTRODUCTION

Le domaine de la formation est **bouleversé par la démocratisation des nouvelles technologies** et la diversité des opportunités qu'elles offrent, telles que la réalité virtuelle, la réalité augmentée ou en intelligence artificielle.

L'offre de technologies de formation ne cesse d'augmenter, et pourtant, leur adoption apparaît parfois limitée. D'une part les structures de formations **manquent d'indicateurs objectifs** pour décider de se munir d'une solution en particulier, souvent fournie sans formation à son utilisation. D'autre part, les développeurs de ces technologies peinent à évaluer les impacts réels de leurs dispositifs : **ils manquent de méthodes et d'outils pour évaluer les performances d'apprentissage**, ou encore **le transfert des compétences aux situations réelles**.

Ce livre blanc expose une réponse systématique sur les enjeux de conception centrée sur les besoins et l'évaluation de technologies de formation pour le cas spécifique de la photonique en France, un domaine stratégique.

A qui s'adresse ce livre blanc ?

Le livre blanc s'adresse à toutes les personnes intéressées par le développement et l'usage et la diffusion des technologies de formation :

- **Développeurs de solution.** Les concepteurs, développeurs et diffuseurs qui orientent les fonctionnalités, les contenus et les interfaces.
- **Formateurs.** Les acteurs en première ligne, ceux qui utilisent dans leurs séquences pédagogiques des outils numériques.
- **Décideurs.** Les institutions qui promeuvent les technologies et soutiennent leur adoption.



LAURÉAT DEFFINUM

Le projet PhOENIX est Lauréat de l'appel à projets DEFFINUM (Dispositifs France Formation Innovante NUMérique), lancé par le ministère du Travail, du Plein emploi et de l'Insertion dans le cadre d'un vaste plan de transformation et de digitalisation de la formation intégré au Plan de relance, co-piloté par le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI), et opéré par la Banque des Territoires dans le cadre de France 2030.



Les partenaires du projet

ALPhANOV

Centre Technologique Optique et Lasers



ALPhANOV est un Centre Technologique reconnu pour son expertise en Optique et Laser. Le centre agit comme un catalyseur d'innovations photoniques en intégrant ces technologies dans des solutions transformantes pour ses clients et partenaires.

Ressourcés par la recherche académique, ALPhANOV imagine et développe des solutions photoniques sur-mesure, fiables et durables qui s'intègrent parfaitement aux chaînes de production des acteurs économiques tout en poursuivant ses efforts pour faire avancer l'état des connaissances sur cette science qui ne cesse d'évoluer.

PYLA

PYLA est le centre de formation d'ALPhANOV. Spécialisé en sécurité laser, optique et photonique, le centre propose depuis plus de 20 ans des formations professionnelles à ses clients en France et en Europe.

Une partie de l'équipe de PYLA, composée d'enseignants chercheurs, de formateurs, d'ingénieurs pédagogiques, de développeurs de réalité virtuelle et de graphistes, développe depuis plusieurs années des outils pédagogiques numériques tels que des modules de réalité virtuelle ou des modules e-learning pour accompagner la formation dans le domaine de la photonique.



CATIE



Accélérateur d'innovation numérique en Nouvelle-Aquitaine, le CATIE accompagne les entreprises dans leur transformation technologique au service de leur compétitivité, du conseil au démonstrateur technologique, en passant par l'état de l'art, la preuve de faisabilité ou encore le développement des compétences. Ses domaines d'expertise couvrent un large spectre (Facteur humain; Intelligence Artificielle et science des données; Systèmes embarqués et objets connectés (IoT); Cybersécurité et protection des données...).

En plaçant l'humain au cœur des démarches de conception, l'équipe Systèmes Centrés sur l'Humain (SCH) permet aux organisations de développer des solutions technologiques alignées à la fois sur les besoins des utilisateurs finaux, les contraintes opérationnelles et les opportunités offertes par les technologies numériques émergentes (réalité virtuelle, augmentée et mixte, applications web et mobiles, dispositifs connectés, IA). Son approche interdisciplinaire originale combine les technologies numériques et les apports des sciences humaines et sociales (sciences cognitives, ergonomie, psychologie, neurosciences) pour concevoir des systèmes numériques performants, utiles et acceptables.

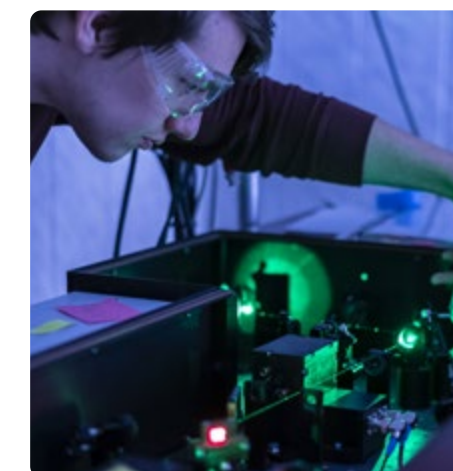


Photonics France

Photonics France, fédération française de la photonique, est le représentant national de la filière auprès des pouvoirs publics. Elle rassemble les acteurs de l'écosystème pour représenter et promouvoir la filière photonique.

Elle réunit les acteurs de la photonique :

- ▶ Industriels : fabricants, distributeurs et services
- ▶ Organismes de Recherche
- ▶ Organismes d'enseignement : de formation initiale et continue
- ▶ Associations : pôles de compétitivité, clusters, société savante, clubs, syndicats



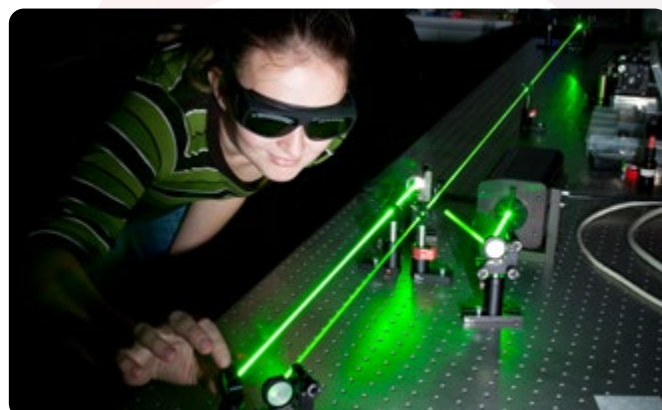
Le projet PhOENIX

La filière photonique en France

La photonique (sciences de la lumière) compte en France près de **1230 entreprises** qui représentent **25 milliards d'euros** de chiffre d'affaire. Le secteur rassemble **90 000 emplois** et recrute **4 000 nouveaux emplois** par an.

La France se place parmi les **5 leaders mondiaux** de l'industrie photonique.

L'Union Européenne place la photonique comme l'une des **6 technologies-clés du 21^{ème} siècle**.



Un projet interdisciplinaire

Le projet **PhOENIX** est un projet interdisciplinaire porté par le centre technologique **ALPhANOV** qui réunit **PYLA**, centre de formation, le **CATIE** - Centre Aquitain des Technologies de l'Information et Electroniques et **PHOTONICS France**, autour d'un objectif commun : **développer les outils numériques pour la formation en photonique**.

Face à une filière en forte croissance, les acteurs de la formation en photonique doivent adapter dès aujourd'hui les parcours pédagogiques et optimiser les formats d'apprentissages pour répondre à l'urgence de former des candidats en un temps record. Les nouveaux outils pédagogiques numériques comme la réalité virtuelle, la pédagogie adaptative ou le micro-learning apparaissent comme des solutions de choix pour former un public hétérogène, tant dans ses qualifications initiales que dans ses possibilités matérielles de formation. Cependant, les travaux de recherche en éducation et en ergonomie montrent que nombre de ces nouveaux dispositifs pédagogiques numériques peuvent être malheureusement contre-productifs car ils n'ont pas été conçus en intégrant des tests dans une communauté d'utilisateurs (conception centrée utilisateur), ni en s'appuyant sur une méthodologie pédagogique ou didactique.

L'ambition de ce projet est donc double. Il s'agit d'une part de produire des outils qui permettent de faciliter et d'amplifier la formation pour la filière photonique et d'autre part de produire des connaissances méthodologiques et des outils facilitant la conception d'innovations pédagogiques numériques et efficaces.

Cartographie de la formation photonique en France

Un travail collaboratif de recensement des formations en photonique en France a été réalisé. Ce qui nous a permis de mettre en lumière l'hétérogénéité des formations et d'avoir une meilleure compréhension et visualisation de la couverture nationale des offres de formations. Cela nous a également permis d'identifier les établissements et formations au sein desquels des observations (9) ont été menées. Cette phase de recueil s'est déroulée sur une période d'un an et a impliqué des déplacements à Paris, Limoges, Metz, Bordeaux et Lannion. Des entretiens et observations ont été conduits auprès d'enseignants/formateurs de ces formations, ainsi que de nombreux apprenants.

L'objectif était de répondre à un double enjeu : d'une part produire une analyse de besoin et d'identifier les enjeux spécifiques du terrain, les verrous techniques et orienter les choix méthodologiques du projet ; et d'autre part, tester à grande échelle la faisabilité d'un recueil de données sur site, axé sur le domaine de la formation.

Les besoins identifiés à l'aide des observations réalisées sur le terrain s'articulent autour de quatre grands axes :



Accès à la cartographie des formations



- 1 Enseigner des **notions théoriques complexes** difficilement visualisables
- 2 S'assurer que les apprenants disposent du **bagage mathématique nécessaire** pour avancer dans la formation
- 3 Permettre un apprentissage et **une maîtrise** des procédures expérimentales (organisation, mise en œuvre, manipulation)
- 4 S'adapter à un **éventail large de projets professionnels** plus ou moins avancés et plus ou moins spécifiques à la photonique

Cette analyse de besoin constitue la première étape de la méthodologie de Conception Centrée sur l'Utilisateur (CCU) proposée par le CATIE, présentée dans la partie suivante.



PHOENIX

MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DES SOLUTIONS NUMÉRIQUES

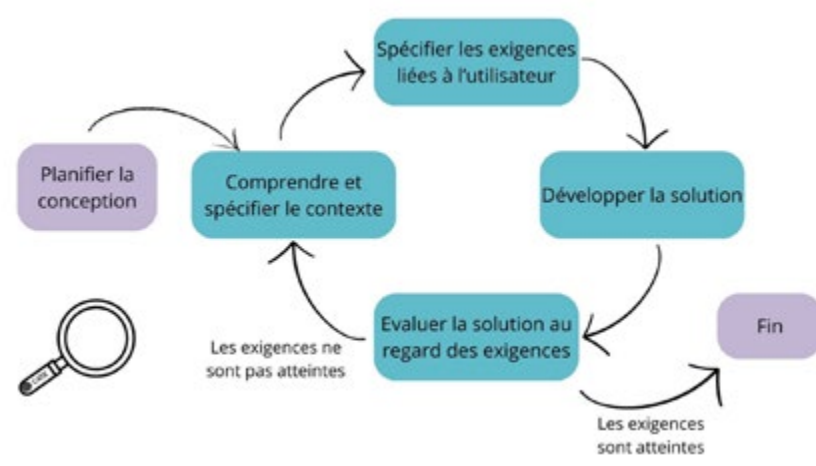


Méthodologie de conception des solutions numériques



par
Aline ROC
Ingénieure facteurs humains

Pour élaborer les nouveaux supports d'apprentissages, le projet PhOENIX s'appuie sur une approche structurée et agile qui met l'accent sur la prise en compte de l'apprenant et du formateur tout au long de la mise en place de la solution : **la conception centrée utilisateur (CCU)**.



A la place d'une séquence "en cascade" jugée trop rigide, on adopte ici des cycles itératifs, répétables autant de fois que nécessaires pour développer la solution optimale.

- 1** **Prise en compte en amont des utilisateurs**, de leurs particularités et de leur environnement (apprenants, formateurs, fonctions support) : comprendre le contexte réel d'utilisation permet de concevoir des solutions adaptées et pertinentes.
- 2** **Participation active des utilisateurs** durant l'ensemble du cycle de développement car leur implication garantit la prise en compte des besoins et l'acceptation du système.
- 3** **Itération des solutions de conception** : chaque prototype est testé et amélioré jusqu'à ce que les besoins et exigences soient satisfaits pour faciliter le retour des expériences des utilisateurs.
- 4** **Répartition appropriée des fonctions** entre les utilisateurs et la technologie : trouver l'équilibre optimal entre action humaine et support numérique.
- 5** **Intervention d'une équipe pluridisciplinaire** dans un processus collaboratif où la diversité des expertises mobilisées permet de construire une expérience utilisateur (UX) optimale.

Produire des outils plus utilisables (efficaces, faciles à prendre en main) et acceptables (mieux accueillis dans leur contexte d'usage)

PLANIFIER

QUOI ?

Définir le cadre est un prérequis essentiel à toute démarche de conception.

COMMENT ?

Anticiper les différents enjeux techniques et méthodologiques, expliciter les exigences et objectifs, identifier les acteurs, choisir les méthodes, définir le planning et les responsabilités.

POURQUOI ?

Construire un groupe d'acteurs alignés et sensibilisés sur l'enjeu de la mise en place d'une démarche de CCU.

RECHERCHER



QUOI ?

Phase de découverte de la population cible, ses caractéristiques, ses contraintes, son environnement pédagogique pour comprendre le futur contexte d'utilisation des outils développés.

POURQUOI ?

Produire un état des lieux, une description qui va guider rapidement la conception vers des outils qui répondent réellement aux besoins et aux attentes. Réduire les coûts et minimiser les risques d'inadéquation entre l'outil et son usage (le coût de l'adaptation).

COMMENT ?

A partir de sources fiables, au contact du terrain : enquêtes, entretien, observations en situation.

CONCEVOIR

QUOI ?

Traduire le besoin en objectifs pédagogiques, profils utilisateurs, scénarios, narratif de la solution.

COMMENT ?

Priorisation collaborative, ateliers (tri de cartes), maquettage, le tout en respectant des bonnes pratiques (guidelines de conception).

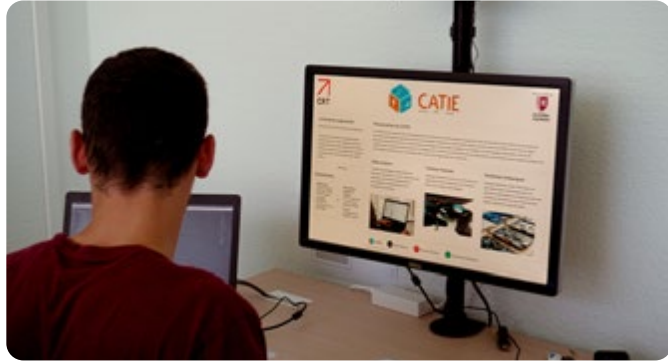
POURQUOI ?

Pour cadrer le développement avec des exigences claires et une base de validation.

DÉVELOPPER ET CONTRÔLER

QUOI ?

Matérialiser une version testable de la solution en faisant les choix design/techniques : navigation, architecture, charte graphique, etc.



POURQUOI ?

Avoir un Minimal Valuable Product (MVP) permet de tester rapidement.

COMMENT ?

Wireframes, code, itérations rapides sur la technique, assurer une implication pluridisciplinaire pour éviter les aller-retours.

Exemples d'objectifs mesurables

taux de succès, nombre d'erreurs, temps d'utilisation, nombre d'étapes nécessaires, recours à une aide externe, rythme d'apprentissage, satisfaction des élèves et des enseignants, etc.

TESTER

QUOI ?

Confronter le prototype aux utilisateurs finaux et recueillir des données (objectives et subjectives).

POURQUOI ?

Fournir un retour d'information qui va permettre l'amélioration fonctionnelle de la solution, vérifier la pertinence.

COMMENT ?

Avec des petits tests utilisateurs (retours UI/UX) et des mesures sur des KPI définis, des évaluations expertes (critères ergonomiques).



ACCESSIBILITÉ DES FORMATIONS



par
Charles FAGES
Ingénieur facteurs humains

Les personnes en situation de handicap ont reçu une attention particulière tout au long du projet PhOENIX, et dans chacune des étapes de conception des technologies de formation.

Le handicap est un terme générique désignant les déficiences, limitations d'activité et les restrictions de participation. En d'autres termes, le **handicap résulte d'une situation** dans laquelle **l'individu est restreint dans sa participation** du fait de **l'inadéquation** entre **ses capacités** et les **attendus de l'activité** qu'il souhaite effectuer.

Pour répondre à cet enjeu, nous avons appliqué des guidelines de conception tirées des frameworks du *Universal Design for Learning* (pour l'amélioration et l'optimisation de l'enseignement et l'apprentissage de toutes les personnes) et de l'*Universal Design for Instruction* (la conception d'un **produit** ou d'un environnement **utilisable par tous**).

« La conception d'un produit ou d'un environnement pour le rendre accessible aux personnes en situation de handicap bénéficie souvent directement au plus grand nombre. » (Burgstahler).

Exemples de guidelines de conception pour les PSH implémentées dans le projet :

1

Fournir des feedbacks spécifiques et réguliers.

Exemple : la solution technologique fournit systématiquement une réponse adaptée lors d'une interaction avec l'utilisateur apprenant.

2

Soutenir la compréhension :

- ▶ Activer ou soutenir les connaissances pré requises.
- ▶ Mettre en avant les patterns, les fonctionnalités critiques, les grandes idées et les relations.
- ▶ Guider le traitement et la visualisation des informations.

3

Soutenir les fonctions exécutives :

- ▶ Guider l'établissement des buts.
- ▶ Soutenir la planification et le développement de stratégies d'apprentissage.
- ▶ Faciliter la manipulation des informations et des ressources.



OUTILS NUMÉRIQUES RÉALITÉ VIRTUELLE

Outils numériques : La réalité virtuelle (VR)

IMMERSIVE PHOTONICS LAB

L'**Immersive Photonics Lab** est un laboratoire d'optique virtuel développé par PYLA, le centre de formation d'ALPhANOV pour accompagner la **montée en compétences dans le domaine de la photonique**. Cet environnement immersif en réalité virtuelle permet d'acquérir **les gestes techniques et procéduraux** indispensables à la manipulation de systèmes optiques et laser, en sécurité et de façon autonome.



Le développement de cet outil mobilise une équipe pluridisciplinaire réunissant développeurs, graphistes, ingénieurs pédagogiques et formateurs ou experts en photonique. Chaque scénario est conçu avec une attention particulière portée à la progressivité des apprentissages, la compréhension des consignes et à la prévention de la surcharge cognitive.

L'immersion ne se limite pas à la reproduction de l'environnement de travail : la physique des lasers est intégrée au cœur du code. L'utilisateur perçoit ainsi les comportements réels d'un faisceau laser, les interférences ou l'état de polarisation d'un faisceau. Cette fidélité, alliée à un accompagnement virtuel par un avatar pédagogique, permet d'**apprendre en autonomie** tout en **consolidant durablement les savoir-faire**.

Destiné à la fois aux établissements d'enseignement et aux entreprises, l'Immersive Photonics Lab répond à un double objectif : **former à la manipulation optique dès la phase d'apprentissage, et maintenir les compétences des professionnels**.



Reproduisant un laboratoire typique de photonique, l'Immersive Photonics Lab offre une expérience d'apprentissage innovante dans ce domaine : les apprenants y manipulent des lentilles, miroirs ou lasers, observent les phénomènes physiques associés et perfectionnent leurs gestes avant toute mise en pratique sur matériel réel. Cette approche favorise **une meilleure compréhension des concepts, tout en réduisant les risques matériels et humains**.

TRAVAUX PRATIQUES PRÊTS À L'EMPLOI :

Les modules VR de l'Immersive Photonics Lab sont développés comme des travaux pratiques numériques indépendants. Ils sont structurés par niveaux de difficulté pour répondre à des objectifs pédagogiques précis, à différents niveaux. L'utilisateur répète les gestes, visualise les phénomènes physiques et bénéficie d'un feedback immédiat.

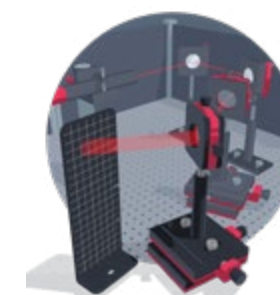
TP n°1 – ALIGNEMENT LASER

Apprendre à aligner un faisceau laser sur un axe défini à l'aide de miroirs et de diaphragmes, jusqu'à une manipulation autonome avec un laser invisible.



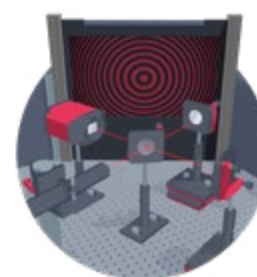
TP n°2 – COLLIMATION LASER

Comprendre et ajuster la position des lentilles pour ajuster la taille d'un faisceau laser et maîtriser sa collimation, puis construire un télescope afocal.



TP n°3 – INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON

Régler un interféromètre, observer les figures d'interférence et interpréter les variations de chemin optique.



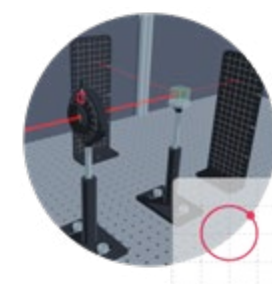
TP n°4 – SÉCURITÉ LASER : CONDUITE DE FAISCEAUX

Apprendre à transporter un faisceau laser en toute sécurité, qu'il soit visible ou invisible en prenant soin de ne réaliser aucune fuite (propagation incontrôlée du laser).



TP n°5 – POLARISATION

Comprendre les propriétés d'un faisceau laser polarisé et expérimenter l'influence de composants optiques tels que les polariseurs et lame d'onde.



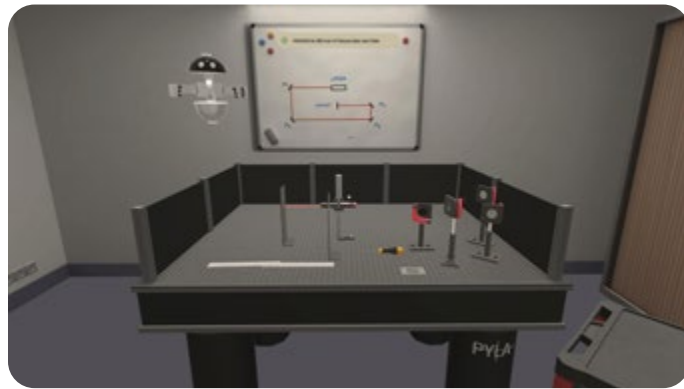
POURQUOI UTILISER LA RÉALITÉ VIRTUELLE ?



par
Julien BRIBET
Formateur -
Réfèrent pédagogique

Dans un domaine aux applications aussi vastes et onéreuses que la photonique, il est parfois difficile de former les apprenants avec des moyens conventionnels (TPs, TDs). On note quatre limitations fortes :

- **Les coûts du matériel réel**, parfois prohibitifs et rédhibitoires, notamment pour le domaine académique ;
- **La complexité de mise en œuvre de certains matériels**, notamment en raison du danger qu'ils pourraient représenter à l'utilisation ;
- **L'immobilisation du matériel et la disponibilité en temps des encadrants**, très fort dans le domaine industriel ;
- **L'explication claire de certains phénomènes physiques complexes ou abstraits** (par exemple, la polarisation de la lumière) rendant la compréhension moins intuitive.



C'est dans ce cadre que la réalité virtuelle trouve tout son intérêt :

- 1** **Rendre disponible du matériel hors de budget**, en conservant un comportement très proche du réel.
- 2** **Accompagner les apprenants et apprenantes** dans leurs premiers pas, de façon autonome.
- 3** **Permettre une visualisation** altérée de la réalité pour faciliter la compréhension d'élément complexe.

L'IPL a donc été développé dans cette optique d'accompagnement du corps enseignant et formateur. Il s'agit d'un outil, complétant les méthodes actuelles de formation pour palier à certaines de leurs limites.

COMMENT CONSTRUIRE PÉDAGOGIQUEMENT UN TP EN VR ?

La construction d'un TP en réalité virtuelle doit suivre un processus que nous vous partageons ici. Celui-ci a été utilisé dans le cadre du projet PhOENIX et s'appuie sur la méthode de développement agile, visant à optimiser les temps de création :

ÉTAPE 1 La définition du sujet

Ce choix va dépendre des besoins du public visé et de son niveau. Nous procédons toujours par questionnement successif du type :

- Quelle formation académique visons-nous ?
- Quel est le niveau des étudiants ?
- Quelle partie de leur programme souhaitons-nous couvrir ?
- Quelles sont les limites/problèmes/manques des équipes enseignantes sur cette partie de programme (manque de matériel, concepts abstraits ou difficiles à représenter...) ?
- La réalité virtuelle est-elle un bon outil pour répondre à cela ; quels en sont les apports par rapport aux autres outils (apprentissage d'un geste, visualisation d'un phénomène invisible autrement...) ?

Une fois ces éléments validés, de petits groupes de travail sont créés par thématiques. Ces groupes sont constitués d'un responsable pédagogique, s'assurant de la construction de l'ensemble et de la cohérence du contenu, d'un expert du métier/du sujet, validant le contenu technique ainsi que visuel et de l'équipe de développeurs VR (programmeurs, graphiste...).

ÉTAPE 2 Le choix du niveau de l'information

Cet élément dépend directement du niveau d'étude de l'apprenant. Dans certains cas, des **prérequis pourront être nécessaires**. L'idée est de se concentrer, dans la réalité virtuelle, sur ce qu'elle a de pertinent à apporter, au **bon niveau** et uniquement cela. Tout le contenu pour lequel elle ne présente pas d'avantage pédagogique doit être retiré et donné via un autre média (dont il faudra définir la nature).

A noter qu'il est tout à fait envisageable de réaliser **plusieurs niveaux dans un TP VR donné**. Chacun de ces niveaux pourra alors satisfaire un niveau d'étude différent et assurer une progression **au rythme de l'apprenant** (du niveau BAC à BAC+5 par exemple).

ÉTAPE 3

Découpage du module

Selon les niveaux envisagés et la quantité de contenu à traiter, nous procédons à un découpage de l'information. Ce dernier doit prendre en compte deux critères importants :

- **Le niveau de l'information** : comme mentionné plus haut, il dépend de l'attendu pédagogique en fonction du public visé (ni trop peu, ni trop) ;
- **Le temps nécessaire dans la VR pour finir le module** doit également être mesuré et limité, les recommandations actuelles visant un temps maximum de 20 minutes par session. Passé ce temps, nous avons noté des difficultés pour une part importante des utilisateurs (maux de tête, baisse de qualité visuelle, baisse de concentration...).

ÉTAPE 4

Rédaction d'un synopsis



Cette étape de rédaction d'un synopsis complet détaille notamment le discours de l'avatar, un robot faisant office de tuteur, accompagnant l'utilisateur durant le module pour lui donner les instructions. Ce document décrit également la nature des expérimentations et des travaux manuels à réaliser ainsi que les illustrations complémentaires à afficher si nécessaire.

ÉTAPE 5

Réalisation d'un prototype

L'équipe de développement des outils de réalité virtuelle mettent alors en oeuvre le code informatique afin de réaliser un premier prototype qui pourra être testé par les équipes pédagogiques.

Cette phase itérative comprend la correction des bugs techniques, et les corrections dans le déroulé pédagogique du scénario en fonction des retours des différents testeurs (interne et externe). S'en suit une campagne de test auprès des utilisateurs.

ÉTAPE 6

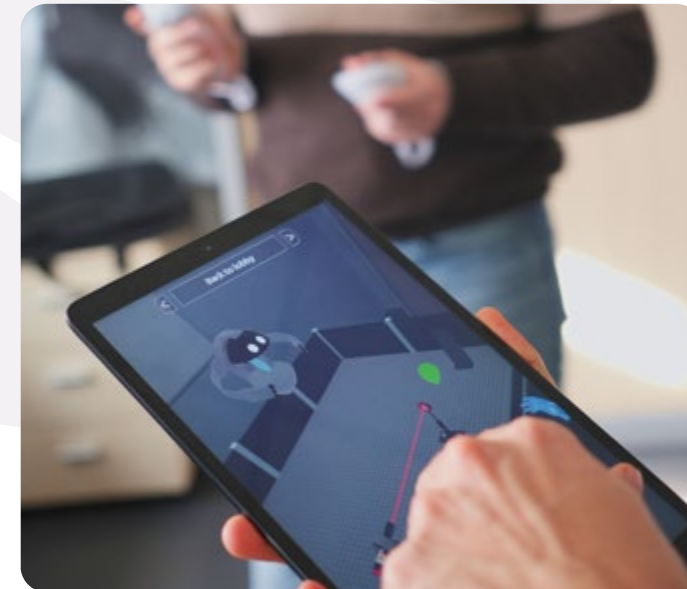
Corrections

CODE INFORMATIQUE : LES ENJEUX TECHNIQUES



par
Yannis KABIR
Développeur VR

L'enjeu principal de l'IPL est avant tout l'aspect technique de sa réalisation. Des compétences en développement informatique poussées sont nécessaires, ainsi qu'une connaissance approfondie d'un moteur de jeu. C'est grâce à ce dernier que l'on peut créer un environnement virtuel en trois dimensions. Dans le cadre de l'IPL, nous avons utilisé le moteur Unity, fortement adapté pour nos besoins. En effet, ce moteur embarque des bibliothèques – des « boîtes à outils » directement utilisables par un développeur – prévues pour la réalité virtuelle, que ce soit pour la création d'espace 3D, ou encore pour s'adapter aux technologies des fabricants de casques VR.



Dans le cadre d'un projet de réalité virtuelle, le choix du type de casque est important. Il en existe deux : les casques dits « PCVR » et les casques autonomes. Le premier type permet d'utiliser la puissance d'un ordinateur extérieur pour le traitement des calculs qui sont nécessaires au bon fonctionnement de l'application. Les casques autonomes quant à eux, sont des casques disposant d'un processeur intégré, permettant de se dispenser de tout matériel supplémentaire

pour leur fonctionnement.

Les ordinateurs offrent généralement une puissance de calcul supérieure à celle des casques disponibles sur le marché. En revanche, cette solution présente un inconvénient majeur : elle nécessite de disposer en permanence d'un ordinateur équipé de l'application, ainsi que d'un câble reliant le casque à l'ordinateur, ce qui peut s'avérer contraignant et peu pratique. Cela ajoute des contraintes de logistiques, qui peuvent être adressées si un aménagement sur le long terme est prévu, mais bien plus contraignant dans le cas d'une utilisation « passe-partout ». Dans le cadre de notre projet, l'objectif étant de distribuer notre solution auprès des universités, lycées, écoles d'ingénieurs, entreprises... nous avons choisi d'opter pour la solution autonome pour la flexibilité qu'elle représente. Cela implique cependant de garder une attention particulière, tout au long du développement de l'application, à l'optimisation du code pour qu'il soit adapté aux performances du casque.

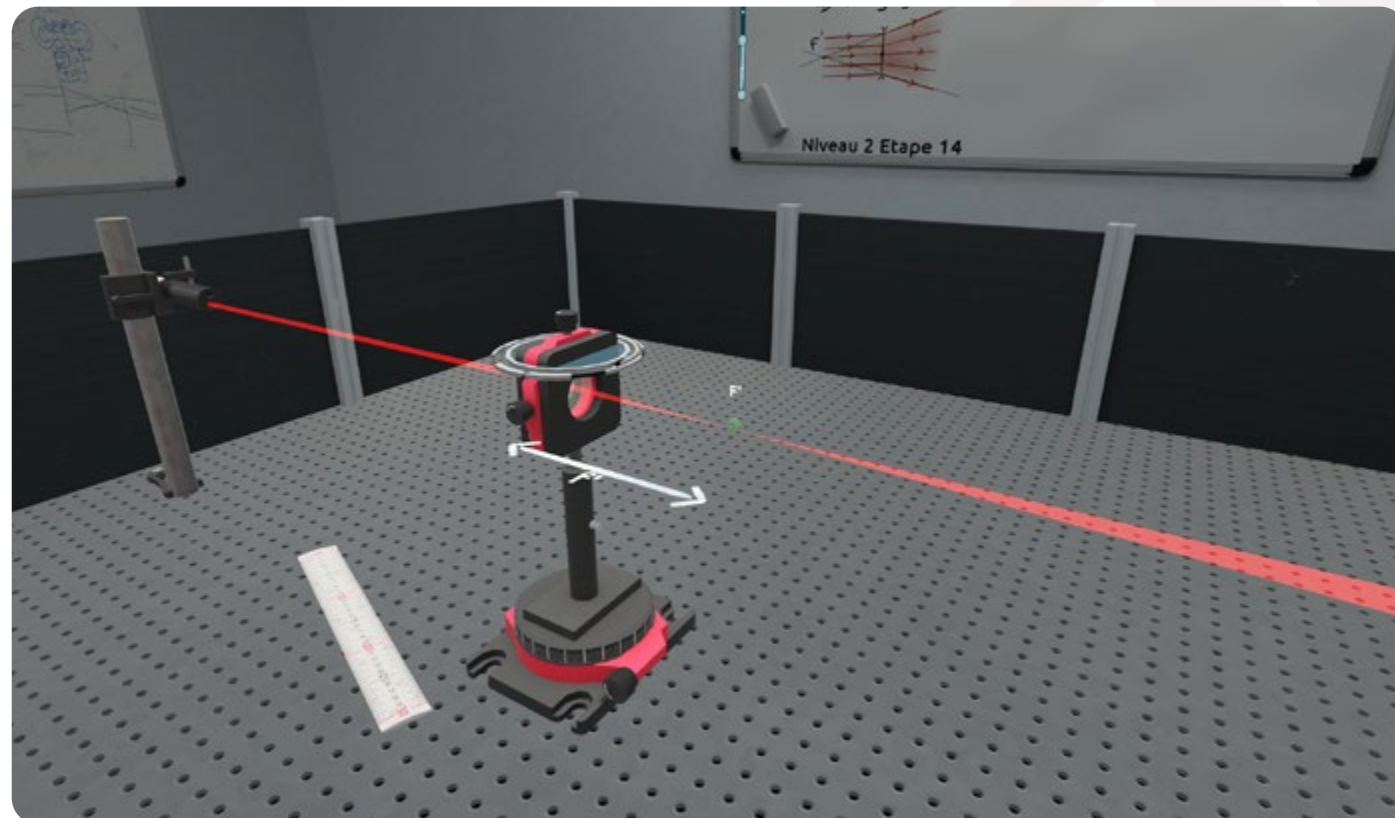
Un outil pédagogique nécessite que l'environnement soit le plus facilement appréhendable. L'expérience utilisateur se doit donc d'être particulièrement soignée, et l'une des premières sources perturbatrices de ce confort est la baisse de la fréquence d'images affichée. Un flux d'images saccadé peut provoquer, à des degrés variables selon les utilisateurs, un trouble appelé « motion sickness ». Même pour une personne peu sensible à ce phénomène, l'expérience reste désagréable. L'optimisation du code est donc essentielle, car sans elle, ces pertes de performance apparaissent rapidement. Il est fortement recommandé de veiller à ce que l'application ne réalise que les calculs strictement nécessaires.

LA PLACE DE LA PHYSIQUE EN INFORMATIQUE

L'un des cœurs techniques du projet est aussi d'adapter les phénomènes physiques réels à un projet informatique. Un travail en profondeur du code qui décrit les comportements des objets est donc important. Un modèle physique adapté à l'informatique, le plus fidèle possible à la réalité des phénomènes physiques de la photonique, est primordial pour pouvoir représenter graphiquement ces comportements.

Pour un laser par exemple, cela se traduit notamment par la manière dont il doit se comporter quand il rencontre un miroir, un diaphragme, une lentille, ou même encore les mains virtuelles de l'apprenant. Nous avons travaillé avec des enseignants-chercheurs en photonique pour couvrir ce besoin.

Cette phase est très importante, car elle va déterminer l'ensemble des fonctionnalités que nous souhaitons implémenter au fur et à mesure que le projet avance dans le temps. De nouveaux modules peuvent demander d'intégrer de nouveaux phénomènes physiques absents, il faut donc prévoir une architecture du code suffisamment flexible pour répondre à ces éventualités. Cela rejoint directement les besoins d'optimisations cités plus hauts – il est inutile de calculer des phénomènes très complexes s'ils ne sont d'aucune utilité pour comprendre ce dont il est question dans les modules d'apprentissage –, ainsi que la nécessité d'une solution aussi proche du réel que possible, favorisant le transfert de connaissance.



Extrait - TP collimation laser en réalité virtuelle

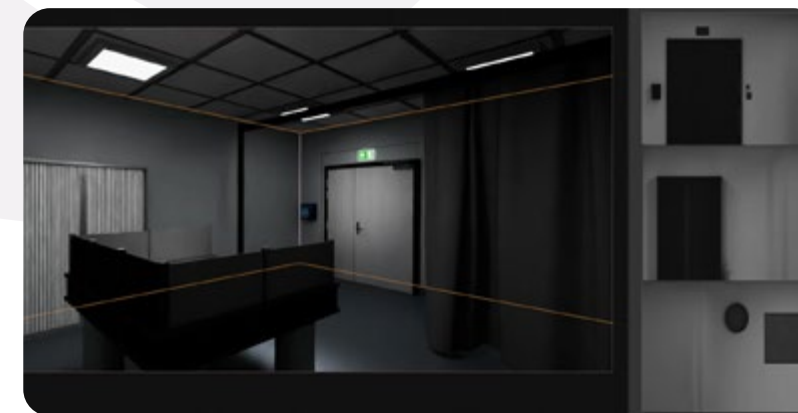
UN ENVIRONNEMENT À REPRÉSENTER

Concernant la conception graphique, comme évoqué précédemment, la problématique centrale est l'optimisation des ressources du casque. L'objectif est de libérer un maximum de puissance de calcul au profit du moteur physique, afin que l'accumulation des traitements physiques et graphiques

ne fasse pas chuter la fréquence d'affichage en dessous de 60 images par seconde (IPS), seuil critique au regard des risques de motion sickness. En gardant constamment cette contrainte à l'esprit, la direction artistique a été pensée pour répondre à deux besoins principaux :

- **Avoir des visuels offrant une cohérence perceptive suffisante pour favoriser l'immersion :** si des graphismes simplifiés peuvent améliorer les performances techniques, ils doivent néanmoins préserver les indices visuels nécessaires à une bonne perception des distances et des interactions, afin d'éviter les incohérences perceptives (échelles, repères) susceptibles de générer de l'inconfort durant la manipulation.
- **Limiter la luminosité de l'environnement de jeu :** lors de l'utilisation d'un casque de réalité virtuelle, les yeux de l'utilisateur sont physiquement très proches de l'écran. Un environnement plus sombre que dans la réalité envoie moins de lumière et limite la fatigue oculaire de la personne qui met le casque.

Pour ce faire, nous avons utilisé dès que possible le « baking » des effets d'ombre sur les différents objets. Il s'agit d'une technique qui consiste à calculer les effets d'ombre et de lumière d'un objet pour le plaquer sur une texture.



Modélisation du laboratoire d'optique sur logiciel Blender

Sur le logiciel de modélisation 3D, le rendu réaliste des ombres peut prendre plusieurs minutes à calculer. L'image qui en résulte peut être exportée pour être utilisée dans le moteur de jeu.

En conséquence, dans le cadre d'un projet de réalité virtuelle dédié à des casques autonomes, comprenant une part de simulation physique, il est déconseillé d'appliquer les pratiques modernes de conception graphique des objets utilisés dans le moteur de jeu. Les méthodes actuelles utilisées dans le jeu vidéo sont destinées à des machines très performantes (consoles ou PC dédiés au jeu). En revanche, les astuces utilisées durant la période des premiers jeux-vidéos 3D correspondent à des considérations qui nous intéressent : des supports de stockage et une puissance limitée.

UN PROJET LONG TERME

Lors du développement d'une application, la question de la temporalité est centrale dans la conception de l'architecture du code.

- **L'application est-elle destinée à évoluer ?**
- **Sera-t-elle mise à jour ?**
- **Devra-t-elle être maintenue sur le long terme ?**

Dans notre cas, les réponses à ces questions nous ont rapidement conduits à considérer que le produit nous accompagnerait pendant de nombreuses années. Une phase approfondie de réflexion en amont est donc indispensable pour construire une architecture robuste et pérenne.

Plus le code est pensé et structuré dès le départ, en anticipant les évolutions futures, moins il sera nécessaire d'y apporter des modifications lourdes par la suite. Prendre le temps de comprendre pré-

cisément les besoins avant de se lancer constitue un gain de temps à moyen et long terme.

Il est également recommandé, pour un projet destiné à durer, de limiter autant que possible l'utilisation de ressources externes. Plus vous maîtrisez votre propre code, moins vous vous exposez à des problèmes de compatibilité ou d'obsolescence liés aux mises à jour de solutions tierces. Un outil externe peut en effet devenir incompatible ou ne plus être maintenu dans le futur.

Développer du code « maison » présente alors plusieurs avantages : vous conservez le contrôle sur son évolution, vous décidez du rythme et des modalités des mises à jour, et vous pouvez plus facilement y apporter des modifications. De plus, ayant conçu et développé ce code, vous en maîtrisez la logique interne, ce qui facilite grandement sa maintenance et ses évolutions.

CONTRAINTES & LIMITES

Si cette technologie est prometteuse à bien des égards, il n'en demeure pas moins qu'elle présente des limitations. Voici quelques exemples :

- Son manque d'intérêt dans le cadre de l'apprentissage de concepts théoriques (où une vidéo ou une lecture sont plus pertinentes) ;
- Une prise en main parfois « impressionnante » due à la jeunesse relative de la technologie et son implantation encore balbutiante ;
- Le besoin d'avoir un espace dédié à l'utilisation (espace dégagé, suffisamment spacieux, éclairé correctement...)





OUTILS NUMÉRIQUES VIDÉOS PÉDAGOGIQUES

Outils numériques : Les vidéos pédagogiques



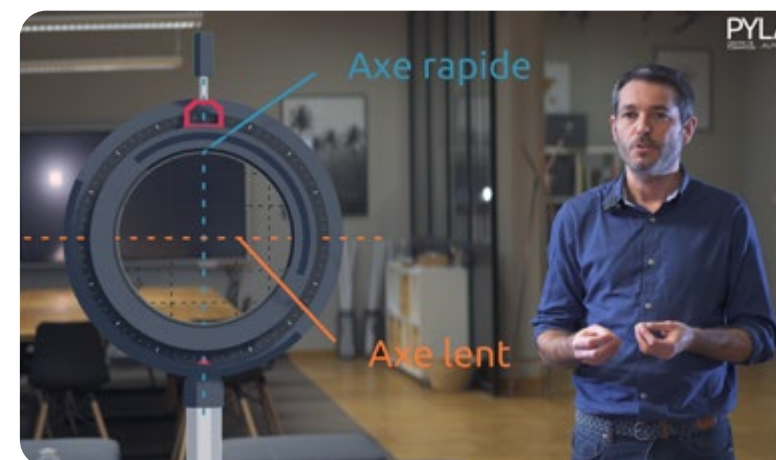
Nicolas VALLERON
Graphiste 2D/3D

Dans le cadre du projet PhOENIX, les équipes ont conçu une série de capsules vidéo pédagogiques destinées à accompagner à la fois les apprenants et les enseignants ou formateurs dans l'usage des outils numériques, et plus particulièrement de la réalité virtuelle.

Une première série de vidéos, réalisées intégralement en animation 3D, guide pas à pas la mise en service des casques VR. Issues de l'expérience terrain, elles détaillent la mise en place du casque, la manipulation des manettes et les bonnes pratiques d'utilisation de l'Immersive Photonics Lab. Ces ressources peuvent être utilisées aussi bien par un formateur préparant un TP de réalité virtuelle que par un utilisateur souhaitant découvrir l'outil en autonomie.



Animation d'une vidéo sur logiciel Blender



Extrait vidéo - La polarisation circulaire

D'autres vidéos viennent compléter les modules de réalité virtuelle, comme celui dédié à la polarisation, en présentant les prérequis théoriques nécessaires à la compréhension du phénomène. Présentées par un enseignant expert, ces séquences offrent un ancrage conceptuel clair avant l'expérimentation en VR. Cette articulation Vidéo-Réalité Virtuelle favorise la progression pédagogique et renforce l'efficacité en adaptant le bon outil numérique selon le type d'apprentissage.

DIFFÉRENTS MÉDIUMS POUR DIFFÉRENTS USAGES

Au préalable nous qualifierons de médium toute forme ou moyen d'expression artistique destiné à transmettre un message. Pour la réalisation d'une vidéo, nous disposons de trois types de médium :

- **La prise d'image** : filmer des personnes, objets, ou capturer un écran (dans le cadre de l'utilisation d'un logiciel par exemple).
- **Le motion design** : faire bouger des objets abstraits (textes, schémas...), comme les animations d'un PowerPoint.
- **L'animation (réaliste ou stylisée)** : faire bouger des objets figuratifs (des objets physiques, des personnages ou décors...)

Que ce soit à travers leur mise en œuvre ou leurs avantages pédagogiques, chacun de ces formats présente des avantages à considérer. Néanmoins, nous devons également prendre en compte le coût de chacun d'entre eux, en matériel ou en temps de production.

Nous avons dans le cadre de PhOENIX fait usage de ces différents médiums. En conséquence, nous verrons à travers ces exemples, qu'il est intéressant d'envisager toutes ces possibilités avant de se lancer dans la production d'une vidéo. Nous ne devons pas non plus oublier de prendre en compte le contexte de sortie de la vidéo (vidéo unique/ série de vidéos, sujet récurrent...).

Tout d'abord, nous devons revenir sur une idée reçue : faire de l'animation coûterait cher, alors que tourner une vidéo serait bien plus facile à mettre en œuvre. En effet, il y a une illusion de simplicité eu égard à la prise d'image notamment parce que les outils nécessaires pour son élaboration nous sont bien plus familiers, notamment nos téléphones portables. La qualité vidéo des smartphones étant aujourd'hui très satisfaisante, et peut être même préférée à l'usage d'une caméra professionnelle ou semi-professionnelle si l'on n'en a pas la maîtrise. Cependant chaque vidéo met en jeu l'image de marque et de sérieux de l'entreprise qui la publie. Il y a plusieurs aspects importants à prendre en compte, pour arriver à une prise d'images de qualité professionnelle :

- **La qualité du son avant tout** : disposer d'un micro et d'un environnement adéquat pour enregistrer correctement la voix (bruit de ventilation ou de couloir, écho...). L'utilisation d'un micro cravate et/ou un micro de podcast peut s'avérer utile.
- **Le choix de l'environnement visuel** est tout aussi déterminant. Il doit être soigné et agréable, sans pour autant être trop stimulant, afin de ne pas détourner l'attention du contenu pédagogique ; bien éclairé, notamment par l'usage d'éclairage artificiel (plus facile à maîtriser sur le long terme que la lumière naturelle).
- **Le choix du ou des intervenants et intervenantes** doit prendre en considération leur disponibilité et leur aise devant la caméra. Une personne très à l'aise à l'oral peut présenter des difficultés devant la caméra et inversement. Elle doit également maîtriser son texte, ou si possible être aidée d'un prompteur.
- **Les gestes métier doivent être répétés** et travaillés pour être les plus compréhensibles possibles pour les spectateurs.



Extraits de la vidéo pédagogique sur la polarisation

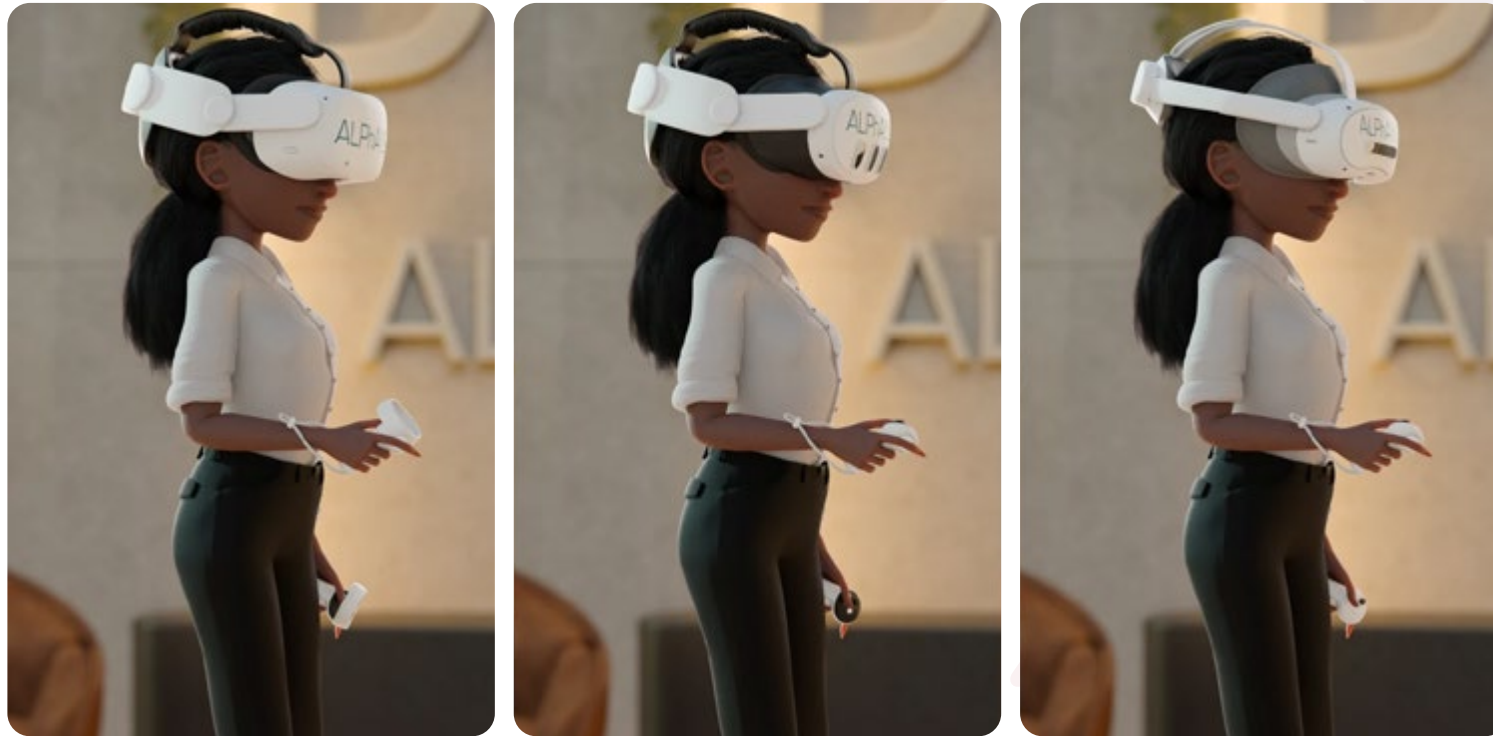
Le montage vidéo ne permet pas de corriger l'ensemble des erreurs. Si la préparation en amont n'est pas suffisamment rigoureuse, il peut être nécessaire d'organiser une seconde session de tournage. Dans certains cas, la prise de vue doit même être entièrement reprise si un problème technique — tel qu'un micro n'ayant pas enregistré le son — n'a pas été détecté pendant le tournage.

À cet égard, l'animation, bien que parfois perçue comme plus technique et moins accessible au premier abord, permet de s'affranchir d'une partie de ces contraintes. Lorsqu'elle est maîtrisée, elle offre une plus grande souplesse de production et peut améliorer significativement la qualité des vidéos, en particulier sur des projets inscrits dans la durée.

La réalisation d'une séquence animée est en effet plus segmentée que celle d'un film traditionnel. Par exemple, la piste sonore peut être enregistrée avant ou après la création des animations, en fonction des besoins et des disponibilités. Elle peut ainsi faire l'objet d'une validation indépendante, permettant une démarche itérative et plus flexible.

Il existe plusieurs manières de caractériser l'animation : selon le rendu visuel (animation 3D, dessin animé, stop-motion, etc.) ou selon la technique employée (animation image par image ou par clés d'animation). Dans le cadre de cette démonstration, nous nous concentrerons sur deux approches : l'animation 2D réalisée image par image et l'animation 3D utilisant des clés d'animation.

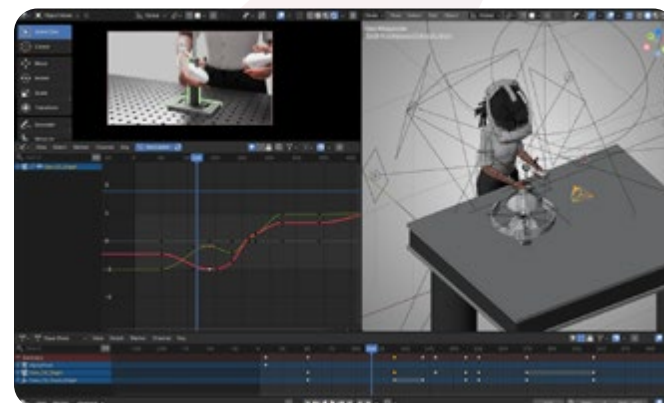
- **L'animation 2D image par image** est plus rapide à produire dans l'immédiat, elle est à envisager pour des projets courts, menés dans des délais contraints, de type « sprint ».
- **L'animation 3D** demande un long travail de préparation. Chaque objet doit être modélisé en 3D, puis paramétré pour pouvoir être mis en mouvement. Ce n'est qu'une fois cette étape terminée que l'on peut procéder à l'animation à proprement parler. Cependant une fois la bibliothèque d'objets 3D mise en place, la phase d'animation est très rapide à mettre en place. C'est pourquoi on peut favoriser cette technique pour un projet de type « marathon ».



Captures de la vidéo tutoriel à l'utilisation de l'Immersive Photonics Lab

Dans l'exemple présenté ci-dessus, nous avons besoin d'une vidéo destinée à accompagner les utilisateurs de notre application en réalité virtuelle. Or, il est probable que cette application évolue dans le temps, notamment à la lumière des retours utilisateurs.

Dans ce contexte, il est bien plus souple et sécurisé de pouvoir actualiser uniquement les éléments concernés de la vidéo, en modifiant un objet ou une animation, par exemple, plutôt que de devoir tourner un nouveau plan raccord plusieurs mois, voire plusieurs années, après la production initiale.



Animation d'une vidéo sur logiciel Blender

Parfois, il est nécessaire de réaliser des animations pour un projet « one-shot », dans lequel l'utilisation de la 3D se serait révélée contre productif. C'est le cas de l'illustration ci-contre, pour un documentaire sur l'histoire du laser. L'animation s'est avérée utile pour s'affranchir de l'utilisation d'images d'archives, parfois difficile à acquérir. De plus, il nous a été possible de commencer à produire des séquences d'animation en parallèle de l'écriture de la vidéo, ce qui a permis une gestion du temps plus efficace.



Extrait vidéo - Histoire du laser

En résumé, nous avons présenté trois cas de figure :

- **Une vidéo sur les phénomènes de polarisation**, très théorique sur un petit nombre de phénomènes : réalisée en prise de vue réelle avec un enseignant expliquant le propos, quelque fois agrémentée de schémas animés.
- **Une vidéo tutoriel de l'Immersive Photonics Lab**, qui aborde principalement l'usage du casque et les gestes à effectuer dans la simulation : réalisée en 3D à l'aide d'assets déjà existants et qui permet une mise en scène présentant à la fois le personnage réel et la réalité virtuelle. Cette vidéo est plus longue à mettre en place mais sera plus facile à modifier par la suite.
- **Une vidéo sur l'histoire du laser**, très théorique et pour laquelle nous ne disposons que peu d'images d'archives : réalisée en animation 2D pour permettre d'illustrer rapidement un propos théorique sur un sujet qui ne sera traité qu'une seule fois.

Cela étant dit, nous devons systématiquement interroger la pertinence de notre direction artistique au regard du contexte de production (délais, budget) et du sujet traité.

Dans notre domaine d'intervention, la technicité de certains concepts nécessite plusieurs allers-retours, impliquant, le cas échéant, des experts chargés de valider la justesse scientifique du contenu et sa cohérence pédagogique. Ce processus peut entraîner des modifications substantielles d'une vidéo, parfois à des stades avancés de sa production.

Dans ce contexte, l'animation constitue un véritable atout, car elle permet une production plus flexible et plus facilement adaptable aux ajustements successifs.

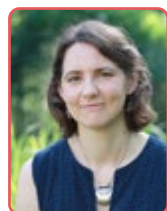
Cependant, si nous abordons des notions parfois abstraites, il ne faut pas négliger l'importance de la dimension humaine : la présence d'un enseignant face caméra contribue à incarner le propos, à humaniser la vidéo et à maintenir l'engagement des apprenants.



MATHS4PHOTONICS

EXERCISEUR DE REMISE À NIVEAU EN MATHÉMATIQUES POUR LA PHOTONIQUE

Outils numériques : Maths4Photonics

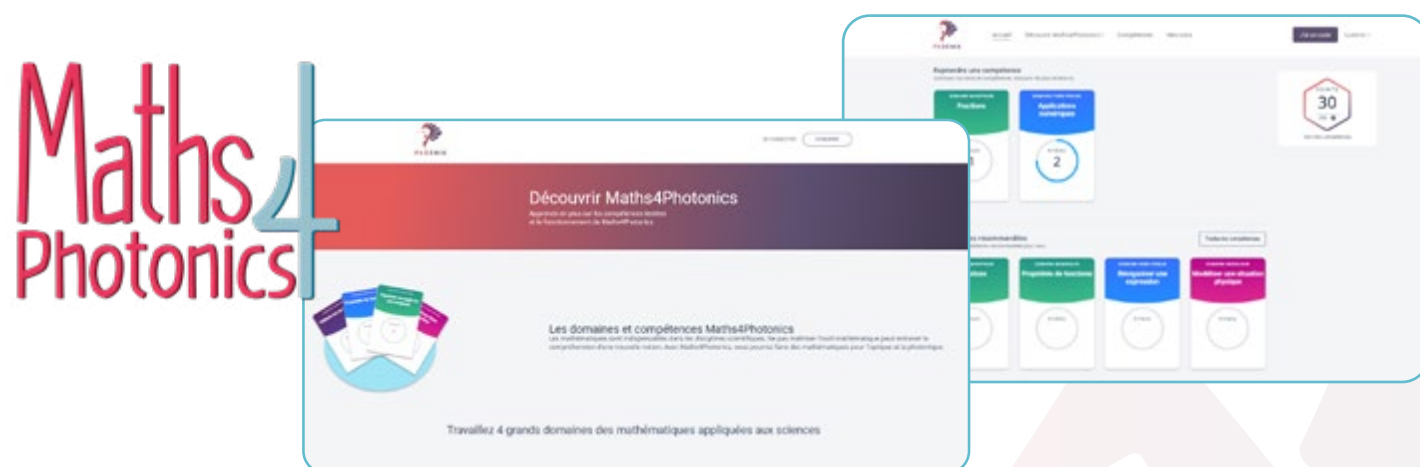


par

Aude CAUSSARIEU

Didacticienne des sciences

Les recherches montrent que le niveau d'habileté mathématique est l'un des meilleurs prédicteurs de la réussite des étudiants et étudiantes en première année de physique dans le supérieur (ref). Ce constat est partagé par les enseignants et enseignantes de photonique du projet PhOENIX. Maths4Photonics avait donc pour objectif de fournir aux enseignants et aux étudiants **un outil pour évaluer le niveau en mathématiques des étudiants tout en leur permettant de s'entraîner et de réviser.**



UN OUTIL QUI S'APPUIE SUR L'EXISTANT

Maths4photonics s'inscrit dans la continuité du projet Maths4Sciences (lien) qui consistait à la production de ressources de remédiation en mathématiques pour les sciences. Ce projet avait permis d'élaborer un référentiel de compétences de mathématiques pour les sciences ainsi qu'une banque d'environ 1500 exercices à correction automatisée avec explications détaillées et d'une cinquantaine de fiches méthodes.

Il s'appuie aussi sur l'infrastructure technologique déjà existante d'un logiciel exerciceur utilisé dans les projets Pix (que tous les bacheliers connaissent) et Ecri+. Cet exerciceur propose aux étudiants de tester leur maîtrise de plusieurs compétences en leur proposant un parcours adaptatif.

Si l'étudiant se trompe à une question, l'exerciceur propose des questions plus faciles, à l'inverse, quand l'étudiant réussit, l'exerciceur propose des questions plus difficiles. L'algorithme est conçu de manière à minimiser le temps passé par l'étudiant à répondre à des questions lors de l'évaluation de son niveau.

Ce logiciel a été adapté par UNISCIEL (l'Université des Sciences en Ligne) pour prendre en compte les contraintes du référentiel de compétences de mathématiques pour les sciences développées dans le cadre du projet Maths4Sciences. UNISCIEL déploie ainsi auprès des universités partenaires la plateforme MAPS : MATHématiques Pour les Sciences (lien).

UN EXERCISEUR DÉDIÉ AUX MATHÉMATIQUES POUR LA PHOTONIQUE

L'enjeu dans le cadre du projet PhOENIX était de développer un exerciceur dédié aux mathématiques pour la photonique. Les savoir-faire testés devaient répondre aux besoins prioritaires à l'entrée dans le supérieur en photonique. Les exercices proposés devaient être contextualisés soit en mathématiques, soit en photonique.

ACTIONS DANS LE CADRE DU PROJET

Dans le cadre du projet Maths4Photonics, nous avons mené plusieurs actions qui nous permettent aujourd'hui d'offrir à la communauté d'enseignant·es et d'étudiant·es un exerciceur centré sur les outils mathématiques nécessaires pour réussir ses premières années de photonique après le bac.

Un référentiel de savoir-faire pour classer des QCM

Lors d'un séminaire avec des enseignants et enseignantes d'optique et de photonique du supérieur (BTS, L1, licence, master), nous avons identifié dans le référentiel Maths4Sciences les savoir-faire à conserver en priorité. Nous avons retenu **21 savoir-faire** qui sont regroupés en **6 compétences principales** :

- 1 Modéliser une situation physique
- 2 Manipuler des fractions
- 3 Isoler une grandeur dans une relation
- 4 Réorganiser une expression
- 5 Réaliser une application numérique
- 6 Analyser des données modélisables par une loi affine

Le savoir-faire « *Additionner ou soustraire une fraction* » est un exemple des savoir-faire concourant à la compétence « *Manipuler des fractions* ».

Afin de produire une variété d'exercices permettant de couvrir tous les niveaux de compétences, nous avons identifié les variables didactiques qui rendent un exercice plus facile ou plus difficile. Par exemple, dans le cas des additions de fractions, l'exercice est plus facile quand les fractions sont données avec des nombres que lorsqu'elles sont données avec des lettres en contexte d'optique.

Que vaut $\frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3}$?

On donne $E = -\frac{d}{R_2} + d \times \frac{d}{R_1 R_2} - \frac{d}{R_1} + 1$
Quelle est l'écriture simplifiée de E ?

L'algorithme utilisé par la plateforme nous demande de classer les exercices de chaque savoir-faire dans 8 niveaux. Le niveau 1 correspond à des exercices réalisables par des élèves de 6^{ème}-5^{ème} alors que le niveau 8 correspond à des exercices dont on imagine qu'ils seront uniquement réussis par des étudiant·es de niveau master.

Nous avons alors défini des critères pour indexer chaque question dans l'un des 6 premiers niveaux. L'ensemble des exercices correspondant à un savoir-faire sont en général rangés dans 3 ou 4 niveaux contigus comme sur l'exemple ci dessous.

Compétence Pix	Savoir Faire	Technique	Niv 1	Niv 2	Niv 3	Niv 4	Niv 5	Niv 6	Niv 7	Niv 8
Manipuler des fractions	Ma-RO-FrSo	Ajouter ou soustraire une fraction en se ramenant au même dénominateur								
	Ma-RO-FrPdt	Multiplier par une fraction, diviser par une fraction								
	Ma-RO-FR	Décomposer et factoriser pour simplifier une fraction								

Ces critères nous ont permis de classer chacun des 360 QCM utilisés dans le projet afin que l'algorithme puisse proposer aux étudiant·es des exercices de complexité croissante pour une même compétence.

Créer de nouveaux exercices

Nous avons commencé par identifier des exercices existants dans la base de QCM d'UNISCIEL et nous les avons classés dans la matrice présentée précédemment. Nous avons ensuite identifié les savoir-faire pour lesquels nous manquions de QCM. Les enseignant·es ont alors produit les QCM manquants soit en contexte de mathématique soit en contexte d'optique.

Le cahier des charges de rédaction d'exercices de ce projet incluait la rédaction d'explications spécifiques pour les mauvaises réponses (distracteurs) et d'une explication générale du raisonnement permettant d'aboutir à la bonne réponse. Nous avons aussi inclus deux phases de relecture. Une relecture scientifique visant à identifier l'absence d'erreurs ou de coquille, et l'explicitation d'éventuels implicites pour qu'il n'y ait pas à connaître de physique pour pouvoir répondre juste aux questions. Une relecture pédagogique visait à éditer les questions pour diminuer la surcharge cognitive liée à certaines formulations ainsi que pour supprimer les éventuels indices laissés lors de la rédaction.

Les exercices créés ont ensuite été indexés afin de pouvoir être utilisés dans l'application.

The screenshot shows the 'Phoenix' application interface. At the top, there's a header with the 'Phoenix' logo and 'Applications numériques'. Below the header is a progress bar with 5 steps, the second of which is active. The main content area displays a physics problem: 'On donne la distance de Rayleigh d'un faisceau laser en entrée d'un afocal $z_0 = z_0^f \cdot \frac{\omega_0}{\omega_0^f}$. $z_0^f = 10^2 m$ distance de Rayleigh après l'afocal'. It lists two parameters: $\omega_0 = 10^{-3} m$ and $\omega_0^f = 10^{-4} m$. The question is 'Que vaut z_0 ?'. Below the question, it says 'Choisissez une seule réponse.' and provides three radio button options: $z_0 = 1 m$, $z_0 = 10^4 m$, and $2 \cdot 10^3 m$. At the bottom right, there are two buttons: 'JE PASSE' and 'JE VALIDE'.

Tester l'exerciceur

Nous avons réalisé quelques tests en classe de l'exerciceur. Les retours nous ont permis de mieux cibler la dernière phase de production de questions pour avoir en particulier davantage d'exercices « faciles ».

RÉSULTATS

Au final, ce projet nous a permis de produire :

- **Un référentiel détaillé** des compétences prioritaires en mathématiques pour la photonique.
- **Une banque de 360 exercices** à correction automatisée couvrant ces compétences dont 320 nouveaux exercices.

Vous n'avez pas la bonne réponse	Explications
Un capteur optique carré de côté $a = 5 \times 10^{-3} \text{ m}$ reçoit une puissance optique $P = 100 \times 10^{-3} \text{ W}$ de manière homogène. L'éclairement en W/m^2 est donné par la relation : $E = \frac{P}{a^2}$ Que vaut l'éclairement ? ☐ $E = 4 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ ☒ $E = 4 \text{ W/m}^2$ ☐ $E = 4 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ Réponse incorrecte. La bonne réponse est la réponse : $E = 4 \times 10^3 \text{ W/m}^2$	On a : $E = \frac{100 \times 10^{-3}}{(5 \times 10^{-3})^2}$ On regroupe les nombres d'un côté et les puissances de l'autre : $E = \frac{100}{5^2} \times \frac{10^{-3}}{(10^{-3})^2}$ On calcule d'abord les nombres : $E = \frac{100}{5^2} \times \frac{10^{-3}}{(10^{-3})^2} = \frac{100}{25} \times \frac{10^{-3}}{(10^{-3})^2} = 4 \times \frac{10^{-3}}{(10^{-3})^2}$ puis on simplifie les puissances : $E = 4 \times \frac{10^{-3}}{10^{-6}} = 4 \times 10^{-3} \times 10^6 = 4 \times 10^3$ On a finalement : $E = 4 \times 10^3 \text{ W/m}^2$

Exemple de capture d'écran montrant à gauche une question et la réponse choisie, dans le cas d'un calcul simple et court. À droite, on trouve les explications disponibles permettant de comprendre la bonne réponse.

L'exerciseur Math4Photonics produit dans le cadre du projet PhOENIX est disponible pour tous et toutes à l'adresse :

maths4photonics.com



QU'EN PENSENT LES UTILISATEURS ?

Un exerciceur très facile à prendre en main

Les tests qualitatifs réalisés montrent que les étudiant·es du supérieur n'ont aucune difficulté à prendre en main l'outil. Ils et elles reconnaissent immédiatement que l'ergonomie de la plateforme est identique à celle de Pix qui est utilisée au lycée. Ce constat conforte notre choix de partir d'une plateforme déjà existante et de ne pas programmer une nouvelle plateforme pour ce public.

“ La plateforme est simple d'utilisation ”

“ Je trouve que cette plateforme est un bon outil d'entraînement assez rapide malgré quelques questions difficiles, avec une interface claire et intuitive ”

“ J'ai bien apprécié la plateforme, c'est super pratique et la séance était cool ”

“ La séance était agréable ”

Un exerciceur ludique

Plusieurs témoignages d'étudiants et étudiantes concourent pour indiquer que les exercices avec correction automatisée sont assez motivants malgré un faible niveau de ludification.

Un sentiment d'efficacité

Les étudiants et étudiantes interrogés ont perçu l'utilité de la plateforme pour réviser les mathématiques et pour s'exercer.

“ Elle [La plateforme] est pratique pour réviser les bases des maths ”

“ Cela permet de prendre connaissance de nos lacunes et de nous améliorer ”

QUELQUES CONSEILS POUR UN PROJET DE CE TYPE

Voici quelques unes des recommandations que nous souhaitons partager avec toute personne intéressée pour monter ou participer à un projet de ce type.

CONSEIL N°1

Prévoir une formation

Le premier point de vigilance est qu'il ne suffit pas d'être enseignant pour être capable de rédiger des QCM d'une qualité suffisante pour être utilisés en évaluation formative et diagnostique.

Les enseignants et enseignantes qui ont rédigé ou relu des questions dans le cadre de ce projet ont chacun reçu une formation d'une journée à la rédaction de questions avec une formatrice spécialisée sur le sujet. Ils et elles ont poursuivi cette formation grâce aux échanges suivant les relectures de leurs questions.

CONSEIL N°3

Constituer une équipe pluridisciplinaire

Nous avons pu apprécier au cours du projet la richesse d'une équipe pluridisciplinaire.

Les enseignants du secondaire apportent leur connaissance des programmes du secondaire et des raisonnements erronés des étudiants. Les enseignants du supérieur apportent l'authenticité des exercices proposés et permettent de vraiment hiérarchiser les besoins.

La présence de deux ingénieures pédagogiques dans l'équipe a permis d'assurer la formation, de répondre aux questions, d'homogénéiser les questions et d'assurer l'indexation des questions pour les utiliser avec l'algorithme de la plateforme.

La diversité de profils rend les réunions de travail enrichissantes pour tous et toutes.

CONSEIL N°2

Prévoir suffisamment de temps pour la rédaction de questions

Il faut beaucoup plus de temps pour rédiger un QCM qui sera mutualisé dans une banque de questions et utilisé dans de nombreux contextes différents à cause du travail de relecture et d'homogénéisation. Et il faut encore plus de temps pour rédiger des explications spécifiques et une explication générale détaillée pour chaque question (surtout quand il y a des équations mathématiques à écrire).

Nous avons compté une moyenne de 1h30 passées par rédacteur et rédactrice pour chaque question produite.

CONSEIL N°4

Former à l'usage de la plateforme

Les outils pédagogiques ne sont jamais « auto-porteurs ». La phase d'introduction de l'activité pédagogique auprès des étudiants est ainsi cruciale dans la manière dont ces derniers vont interagir avec la plateforme.

Est-ce qu'ils et elles vont essayer d'aller le plus vite possible ? Est-ce qu'ils et elles vont lire les explications spécifiques ? Utiliser un brouillon ?

PERSPECTIVES

Evaluer l'utilisation de la plateforme

La durée du projet (3 ans) a permis de constituer une équipe pédagogique et de construire les ressources pour avoir un exerciceur opérationnel. Cette durée n'a cependant pas permis la réalisation d'un assez grand nombre de tests en « conditions authentiques » pour pouvoir évaluer l'efficacité de l'outil. L'une des raisons a été que le fonctionnement de la plateforme (via l'algorithme de recommandation) était très impacté par le nombre d'exercices et qu'il a fallu attendre la fin de la phase de production pour avoir assez de questions pour réaliser des tests.

Il serait donc intéressant dans le futur de conduire des évaluations qualitatives et quantitatives de l'utilisation de la plateforme en distinguant les publics étudiant-es et les scénarios pédagogiques mis en œuvre.



par
Capucine IBARLUCIA
Ingénieure facteurs humains

ADAPTATIVE LEARNING

L'Adaptive Learning (apprentissage adaptatif) désigne l'ensemble des dispositifs numériques capables d'ajuster en temps réel les contenus, les activités et les modalités d'apprentissage en fonction des caractéristiques et des besoins d'un apprenant.

Dans le cadre de travaux exploratoires sur l'automatisation des formations numériques, compte tenu de l'essor de l'intelligence artificielle, les enjeux suivants permettront de développer des algorithmes d'Adaptive Learning qui vont plus loin que les performances d'apprentissages :

- **Enjeu conception technique** : favoriser une bonne transparence et compréhensibilité des systèmes, penser l'interopérabilité avec les différents outils du formateur, les comportements de l'interaction.
- **Enjeu conception pédagogique** : choisir le dispositif numérique en fonction du type d'activité cognitive attendue (restituer une connaissance, appliquer une procédure, donner un sens, etc.), documenter les stratégies de recherche d'information et de résolution de problème de l'apprenant, ses habitudes de révisions, ses modalités favorites.
- **Enjeu profil de l'apprenant** : explorer ses capacités attentionnelles, ses leviers motivationnels, sa fatigue numérique et temps d'écran, son appétence et habitude pour le dispositif numérique.
- **Enjeu évaluation d'impact** : mesurer l'efficacité réelle, les impacts sur les performances d'apprentissage, l'engagement, le transfert des apprentissages en situation réelles.

Prendre en compte l'ensemble de ces enjeux favorisera l'amélioration de ces nouveaux outils au sein des formations et maximisera leur intégration.



PHOENIX

ÉVALUER ET VALIDER DES OUTILS DE FORMATION



Évaluer et valider des outils de formation

Dans le cadre du projet PHOENIX, les solutions numériques ont été évaluées selon trois catégories d'évaluation différentes, avec des objectifs distincts.

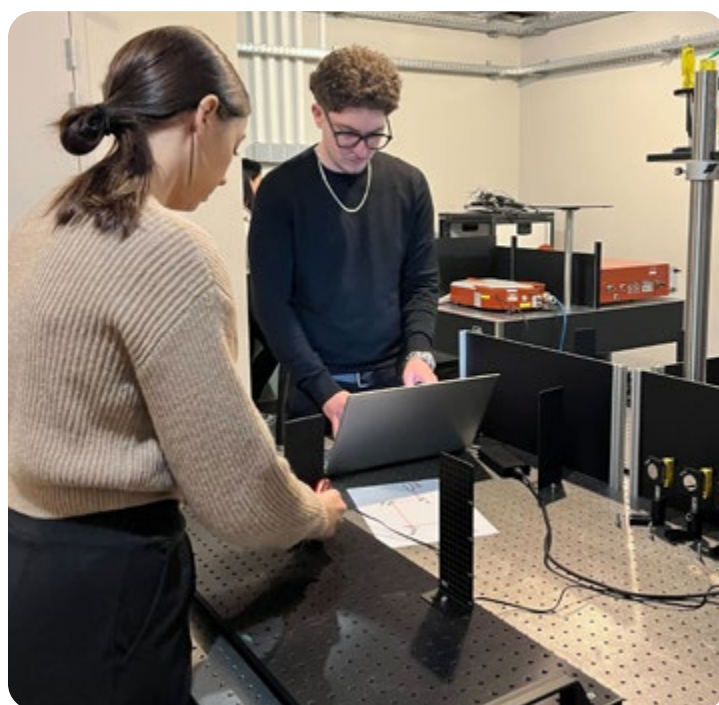


par
Enola CONSTANCEAU
Ingénieure facteurs humains

1 L'ANALYSE EXPERTE

DÉFINITION

Cette méthode repose sur les connaissances et l'expertise d'un groupe de spécialistes des facteurs humains qui évaluent le système sur la base d'heuristiques issues de la littérature scientifique.



EXEMPLE

Math4Photonics a été évalué à l'aide de cette méthode. Des ingénieurs et ingénieures du CATIE ont analysé cette plateforme en se basant sur des critères d'accessibilité, de praticité, issus de la littérature. Une fois les analyses réalisées de manière individuelle, elles ont été mises en commun dans le but d'identifier des préconisations et de les prioriser.

QUEL EST L'OBJECTIF ?

- **Identifier les axes d'améliorations** et les éléments pertinents des solutions numériques pour fournir des préconisations aux concepteurs.
- **Réaliser une étude facile et rapide** à mettre en place (notamment pertinent lors de la réalisation de sprints itératifs).
Attention : Ne remplace pas l'implication des utilisateurs finaux.

COMMENT FAIRE ?

- **Ne nécessite pas d'utilisateurs finaux.** Il s'agit de tests réalisés en interne.
- **Utilisation d'outils de récolte de données** tels que des grilles d'observation et d'entretiens adaptés couplés à l'expertise des expérimentateurs qui permettent d'identifier au mieux les préconisations à fournir.

2 L'ÉVALUATION UX

DÉFINITION

Méthode qui consiste en l'évaluation d'un produit ou service, tout au long de sa conception, en le mettant à l'essai face à un échantillon représentatif de ses utilisateurs, afin d'en déduire des améliorations.

COMMENT FAIRE ?

- **Le recrutement des utilisateurs** doit correspondre aux profils liés aux besoins identifiés.
- **Utilisation d'outils de récolte de données** tels que des grilles d'observation et d'entretiens adaptés et des questionnaires.

QUEL EST L'OBJECTIF ?

- **Rendre compte des interactions** des utilisateurs finaux avec la solution numérique.
- **Optimiser l'expérience utilisateur** pour améliorer la satisfaction et l'engagement des utilisateurs en tenant compte de leurs besoins et des objectifs des concepteurs.



EXEMPLE

Ce protocole a été conçu dans le but d'améliorer de manière itérative des vidéos tutoriels sur la mise en place d'un casque de réalité virtuelle. Le but principal est d'analyser les comportements observés (actions réalisées), le temps d'exécution pour chaque étape et la tâche complète, ainsi que les retours qualitatifs sur la clarté et l'utilité perçue du tutoriel chez les utilisateurs et utilisatrices novices. L'étude a été réalisée des participants et participantes novices dans l'utilisation de la VR. Pour mener à bien l'évaluation UX, une grille d'observation, une grille d'entretien et un questionnaire socio-démographique ont été spécifiquement conçus via la plateforme Peac²h.

Lien de l'étude Peac²h



3 L'ÉVALUATION D'IMPACT

DÉFINITION

Méthode qui consiste en l'évaluation et la mesure de l'impact d'une technologie sur les utilisateurs, notamment sur leurs processus d'apprentissage.

COMMENT FAIRE ?

- Le recrutement des utilisateurs doit correspondre aux profils liés aux besoins identifiés, et les utilisateurs doivent être comparables entre eux.
- Les participants sont répartis selon plusieurs groupes : un par solution numérique et un groupe contrôle sans solution numérique.
- L'évaluation se déroule selon plusieurs sessions expérimentales.
- Des outils de récolte de données tels que des grilles d'observation et d'entretiens adaptés, et des questionnaires sont nécessaires.

EXEMPLE

Une évaluation a été menée pour évaluer le module "sécurité laser" de l'IPL. Cette étude explore l'impact d'un entraînement virtuel sur une situation de restitution réelle, en comparant un groupe recevant un entraînement en réalité virtuelle (VR) à un groupe ne recevant pas cet entraînement VR mais pratiquant uniquement sur table réelle. Le protocole a été initié avec des étudiants de licence et de master dans des formations de photoniques à l'Université de Bordeaux. Dans le but de récolter des données pertinentes et de manière homogène, une grille d'observation spécifique a été conçue via la plateforme Peac²h sur la base d'une co-construction impliquant les experts métiers de PYLA et les ingénieurs du CATIE.

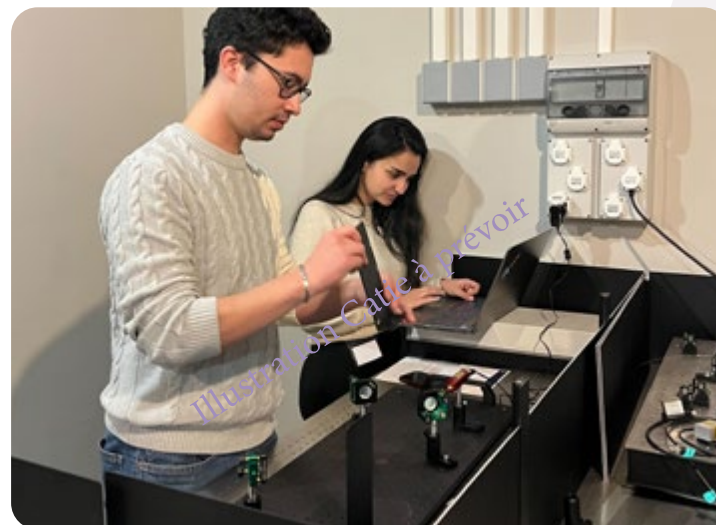
Lien de l'étude Peac²h



QUEL EST L'OBJECTIF ?

S'assurer qu'un apprentissage réalisé via une solution numérique est bien transféré dans les pratiques de l'apprenant en situation réelle, et recueillir des indicateurs sur l'utilité, l'efficacité et l'impact des dispositifs.

- **Valider l'impact** d'une technologie éducative avant son déploiement.
- **Comparer plusieurs dispositifs** pour identifier le plus efficace.



RÉSULTATS DU PROJET



par
Joseph GARDETTE
Ingénieur facteurs humains

L'analyse du besoin réalisée par le CATIE a permis d'identifier et de rendre accessible des sites d'expérimentation pertinents, et d'effectuer des recrutements ciblés.

Les observations réalisées sur le terrain ont mis en lumière des écarts réels d'opportunités de manipulation sur banc optique entre les différentes formations. Un manque d'entraînement général des apprenants, dû aux coûts matériels et de supervision, a aussi été identifié.

Pour le CATIE, le projet PhOENIX a été porteur d'opportunités telles que la mise en place de protocoles expérimentaux ambitieux, longitudinaux s'étalant sur plusieurs mois, conçus en collaboration avec des experts métier. Ces protocoles ont pu être intégrés à des formations existantes, permettant la réalisation des évaluations avec des étudiants de divers parcours. Cela a donné l'occasion aux modules de formation VR développés par PYLA d'être diffusés dans ces mêmes parcours.

Les résultats issus des évaluations ont démontré que les modules VR de l'IPL favorisent l'adoption de bonnes pratiques par les élèves, et réduisent les comportements à risque au cours des manipulations réelles.

Les bénéfices associés à ces résultats sont doubles :

- **Permettre plus de situations de manipulation sans dégrader l'organisation des formations et les performances d'apprentissage.**
- **Offrir des possibilités de manipulation autonome et sans danger.**

Les vidéos pédagogiques, conçues pour accompagner les étudiants au cours des TP réels et/ou en VR, ont été perçues comme compréhensibles et utiles par les utilisateurs.

Les retours qualitatifs ont fait émerger des préconisations permettant d'aiguiller les futures itérations.

Les résultats issus du projet ont permis d'identifier les points forts et les axes d'améliorations de solutions testées.

Ces retours sont essentiels pour :

- **Optimiser l'expérience utilisateur** en ajustant les contenus et interfaces en fonction des besoins identifiés.
- **Affiner les recommandations** en s'appuyant sur des données objectives et des observations terrain.
- **Améliorer les méthodologies d'évaluation** en testant et en adaptant des protocoles reproductibles.



CONCLUSION

Au terme de ce projet, plusieurs réalisations majeures ont vu le jour pour renforcer la formation en photonique et, plus largement, enrichir l'écosystème EdTech (Technologies pour l'Éducation) :

- ▶ **Des dispositifs technologiques dédiés** : Immersives Photonics Lab (IPL), vidéos pédagogiques dynamiques, plateformes e-learning en mathématique.
- ▶ **Des méthodologies de conception adaptées** à la création de ces dispositifs, basées sur des approches itératives et collaboratives.
- ▶ **Des méthodologies d'évaluation d'impact en situation**, mises à disposition via la plateforme Peac²h, pour mesurer l'efficacité des outils et guider les améliorations futures.
- ▶ **Des ressources de partage de connaissances** : compréhension du fonctionnement de l'humain en situation d'apprentissage, conception inclusive pour les personnes en situation de handicap, bonnes pratiques pour les vidéos pédagogiques...

Ces protocoles, développés dans le cadre du projet, ont vocation à bénéficier à l'ensemble des acteurs de l'EdTech, indépendamment du type de dispositif technologique. Certes, leur mise en œuvre peut sembler coûteuse en temps et en moyen. Pourtant, l'expérience montre que les méthodologies agile et de Conception Centrée Utilisateur réduisent significativement les coûts globaux et favorisent l'acceptabilité des solutions. En intégrant très tôt les usages et les utilisateurs, elles facilitent l'adoption des dispositifs dans les séquences pédagogiques et sur le terrain.

Et demain ?

Les perspectives ouvertes par ces travaux sont nombreuses :

- ▶ **Renforcer l'accompagnement des formateurs** dans l'intégration des EdTech à leurs pratiques.
- ▶ **Permettre une adaptation fine des contenus et interfaces** par les formateurs eux-mêmes, afin d'assurer une meilleure appropriation.
- ▶ **Explorer le rôle croissant de l'intelligence artificielle**, tant dans la personnalisation des apprentissages que dans l'évaluation des dispositifs.

Ainsi, la photonique dispose désormais d'outils, de méthodes et de perspectives pour faire évoluer la formation.

**RETROUVEZ CE LIVRE BLANC ET
D'AUTRES CONTENUS SUR LE SITE VITRINE**

orientation-photonique.org/projet-phoenix



Les ressources

LIENS



Immersive Photonics Lab

pyla-formation.com/modules-de-realite-virtuelle

Maths4Photonics

maths4photonics.com



Ressources en téléchargement :

- Guides méthodologiques
- Protocoles d'évaluations
- Guides de bonnes pratiques
- Guides de conception pour le handicap
- Fiches outils pédagogiques
- Manuel de fonctionnement de l'humain

expe.peac2h.io/project-sites/phoenix/ressources



LES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Bribet, J., Lescieux, L., Hentati, T., Roc, A., Fage, C., & Pointreau, M. (2025, May). Overcoming the lack of practice in laser safety training with Virtual Reality. In 2025 IEEE Conference on Education and Training in Optics and Photonics (ETOP) (pp. 1-4). IEEE.

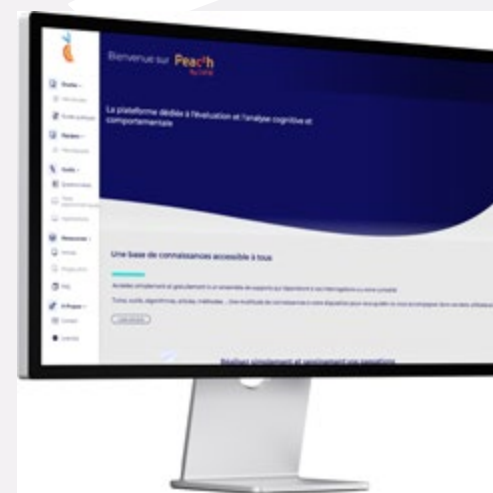
Constanceau, E., Roc, A., Ibarlucia, C., Gardette, J., Hentati, T., Fage, C., & Pointreau, M. (2025, November). Transfert des apprentissages après une formation en réalité virtuelle (VR): une recherche in situ appliquée à la sécurité laser en photonique. In IHM'25-36e Conférence Internationale Francophone sur l'Interaction Humain-Machine.

Fabre, B., Bribet, J., Lescieux, L., & Caussarieu, A. (2024). Improving efficiency in optics education with immersive virtual reality. Optical Engineering, 63(7), 071411-071411.

Lescieux, L. (2023). La réalité virtuelle au service de l'apprentissage en photonique. Photoniques, (123), 26-30.



Découvrez **Peac²h** - La plateforme d'évaluation et d'analyse cognitive et comportementale



Peac²h permet de :

Sensibiliser sur la démarche de **Conception Centrée Utilisateur** et **Facteurs humains** (FH).

Simplifier l'accès aux FH, leur intégration et en **réduire les coûts d'accès**.

Être **autonome** sur la conception et passation de **tests utilisateurs** et l'interprétation des résultats.

Mettre à disposition des **uses cases** et **outils innovants** pour l'évaluation des usages.

Proposer une réponse aux besoins de **formation** et d'**accompagnement des entreprises**.

REMERCIEMENTS

Ils ont contribué au projet PhOENIX :

Charles FAGE, Aline ROC, Joseph GARDETTE, Capucine IBARLUCIA, Énola CONSTANCEAU, Florian LARRUE, Maïlys POINTREAU, Turkan HENTATI, Quentin GOBERT, Marie-Laure SENE, Matisse POUPARD, Charles MILLE - **CATIE** / Maxime VALLERON, Yannis KABIR, Nicolas VALLERON, Axelle VACHERON, Julien BRIBET, Manon DEVEUGLE, Magali GARCIA, Ludovic LESCIEUX, Elisabeth BOERI - **ALPhANOV - PYLA** / Fabrice MICHEL, Ivan TESTART - **Photonics France** / Baptiste FABRE, Eric CORMIER - **Université de Bordeaux** / Aude CAUSSARIEU / Christophe REILLAC, Mikaël SEDZE-HOO, Vincent CRUZ - **Éducation Nationale** / Catherine GOLLY, Sophie JECQUIER - **UNISCIEL** / Ludovic GROSSARD - **Université de Limoges** / Virginie CODA-BOUCHOT - **Université de Lorraine** / Fabienne GOLDFARB, Jordane MATHE, Grégory GREDAT - **Université Paris Saclay** / Pierre GUILLEMET, François FAIJAN - **ENSSAT** / Oscar WIRTH, Alice ELIE - **CAISSE DES DÉPÔTS**

Comité utilisateurs et partenaires :



Expérimentation personnalisée

Concevez vos propres outils et études adaptés à votre besoin



Suivi en temps réel

Suivez et gérez l'avancement de vos études en direct



Export de données

Exportez les résultats de vos études aux formats csv pour vos analyses

Gratuite et accessible en ligne

<https://app.peac2h.io/>





ALPhANOV

-  Rue François Mitterrand
33400 Talence
-  05 24 54 52 00
-  www.alphanov.com
-  info@alphanov.com
-  Lien LinkedIn ALPhANOV

PYLA

-  Rue François Mitterrand
33400 Talence
-  05 64 31 08 92
-  www.pyla-formation.com
-  contact@pyla-formation.com
-  Lien LinkedIn PYLA

CATIE

-  Avenue des Facultés
33400 Talence
-  05 64 31 01 00
-  www.catie.fr
-  contact@catie.fr
-  Lien LinkedIn CATIE

PHOTONICS FRANCE

-  60 avenue Daumesnil
75012 Paris
-  01 83 92 31 20
-  www.photonics-france.org
-  contact@photonics-france.org
-  Lien LinkedIn PHOTONICS FRANCE

Toute reproduction, représentation et/ou utilisation, intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit du Livre Blanc faite sans obtention préalable de l'autorisation d'ALPhANOV, Pyla, Photonics France et du CATIE, y compris mais sans s'y limiter des données, informations, outils, méthodologies et/ou protocoles présents et/ou accessibles depuis le Livre Blanc, est illicite et constitue une contrefaçon.

Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions, représentations et/ou utilisations strictement réservées à un usage non commercial, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées et à la condition de citer la source comme suit : « LIVRE BLANC - Projet PhOENIX », ALPhANOV, Pyla, Photonics France et CATIE (2026).

Les partenaires du projet PhOENIX ne donnent aucune garantie relative à la pertinence de l'utilisation de tout ou partie du Livre Blanc.