

Perspectives pour l'Enseignement des Sciences au Maroc

Contribution du

*Groupe de Réflexion sur l'Enseignement des Sciences**

Version V1, 24 avril 2017

*Groupe composé des personnes suivantes : Mohammed Cherkaoui, Rajae Cherkaoui, Rajae El Aouad, Abdelhaq El Jai, Nadia El Kissi, Abdeljabbar El Manira, Malik Ghallab, Nadia Ghazzali, Driss Ouazar, Albert Sasson, Wafa Skalli, et Mohammed Smani.

Table des matières

Résumé et principales recommandations	3
1 Introduction	8
1.1 Contexte de cette contribution	8
1.2 Périmètre de la réflexion	8
1.3 Limitations	10
1.4 Mesures pour donner suite à ce travail	11
2 Motivations et objectifs	12
2.1 Rôle de l'école	12
2.2 Rôle de l'enseignement des sciences	12
3 Situation et leviers d'action	18
3.1 Etat de l'enseignement des sciences au Maroc	19
3.2 Leviers pour infléchir la situation	23
4 Vision pour l'enseignement des sciences	26
4.1 Principes	27
4.2 Méthodes	32
4.3 Matières	34
4.4 Alphabétisation numérique	49
5 Pédagogie active	52
5.1 Quelques notions de base	53
5.2 Mise en œuvre pratique	55
5.3 Stratégies pour un apprentissage actif	57
5.4 Conclusion	62
6 Recommandations	63
6.1 Enseignement des sciences	63
6.2 Formation des formateurs	64
6.3 Environnement éducatif	65
6.4 Accompagnement social	65
Annexes	67
A Sciences du vivant	67
A.1 Introduction	67
A.2 Concepts de base des sciences du vivant	68
A.3 Des concepts leur mise en œuvre pédagogique	72
A.4 Conclusion	72
B Mathématiques et statistique	74
C Sciences numériques	78
C.1 Introduction	78
C.2 Sciences numériques	78
C.3 Pédagogie numérique	83

Résumé

Le capital humain est la clé du développement des peuples. La formation par la démarche scientifique et l'enseignement des sciences déterminent les qualités humaines essentielles et les capacités d'apprentissage nécessaires à l'appréhension des problèmes de la vie individuelle et sociale. De nombreux pays s'efforcent de réformer profondément et d'enrichir cet enseignement.

Ce document propose une vision et apporte des éléments pour la formation par les sciences, l'ingénierie et les mathématiques au Maroc. L'objectif est de former *tous* les marocains de demain en citoyens pleinement conscients, épanouis et responsables de leur humanité. On vise l'acquisition, par chaque jeune, des *fondamentaux* qui en feront un adulte responsable et épanoui :

- *apprendre à s'informer, s'exprimer et raisonner* ;
- *apprendre à apprendre, à faire, à être et à vivre ensemble* ;
- se percevoir correctement dans le monde comme être conscient, solidaire et interdépendant de son environnement humain, social et bio-physique.

On propose de contribuer à cet objectif par une pédagogie active permettant d'appréhender, de pratiquer et d'acquérir la démarche scientifique. Cette démarche révèle et cultive la curiosité naturelle, l'enthousiasme, l'émerveillement et la sensibilité de l'enfant. Elle éveille ses sens pour l'observation fine ; elle aiguise son imagination, son engagement et sa persévérance à expérimenter et chercher à comprendre. Elle lui apprend l'écoute, la rigueur, la critique et la valeur de l'erreur. Elle lui permet de rechercher les faits avérés, démontrés et justifiés, dans les domaines qui relèvent de la science. Elle lui apprend à accepter avec tolérance les croyances, opinions et préférences d'autrui pour ce qui est hors du champ de la science et à bien discerner ce champ. Elle forme sa perception de citoyen du monde, solidaire de ses semblables.

La vision proposée s'appuie sur une *pédagogie active* qui développe un enseignement mettant en avant :

- des *principes* scientifiques,
- des *méthodes* scientifiques, et
- des *matières* ou connaissances scientifiques.

Ces dernières sont un vecteur de formation générale par la démarche scientifique. Cette formation familiarise l'enfant à des activités d'investigation, d'exploration du réel par un questionnement ouvert, précis et rigoureux. Elle développe sa créativité pour la conception de réponses adéquates aux problèmes posés, pour la recherche d'explications des faits observés, de justifications et de preuves. Elle lui apprend l'analyse de ses observations et de ses réponses, la confrontation aux réalités de l'expérience, l'évaluation critique de ses hypothèses et de ses solutions.

Cette vision conduit à énoncer plusieurs recommandations, dont les principales sont résumées ci-dessous.

A. Pédagogie active

- Conjuguer des activités ou des exercices suscitant l'observation, l'exploration, puis l'évaluation critique des analyses faites par les élèves (apprenants). Confronter les observations, réalisées par l'expérience, à des hypothèses.
- Savoir résumer les résultats de cette démarche d'investigation et d'esprit critique en un corpus de connaissances qui devra évoluer d'une année ou d'un cycle à l'autre.
- Apprendre à apprendre en science, ingénierie et mathématiques (STEM), n'exclut pas des curriculums à contenu raisonnable qui sont des supports indispensables à cette démarche.
- Conduire l'apprenant, qui doit savoir lire, écrire et compter, à la fin du cycle de l'enseignement primaire, et qui doit donc maîtriser les mécanismes cognitifs nécessaires, avec les connaissances fondamentales indispensables (accumulées ou déduites des exercices pédagogiques dans les trois domaines), à aller plus loin, c'est-à-dire apprendre à s'informer, à rechercher la documentation (seul(e) ou en groupe), à s'exprimer et à raisonner.
- Recourir à l'outil numérique (alphabétisation numérique) à la fois pour appuyer la démarche pédagogique, pallier au manque de moyens, comme l'absence de matériels ou d'équipements expérimentaux, et pour faciliter le travail en groupe des apprenants.
- Renforcer au préscolaire et à l'école primaire, les formes ou activités ludiques très concrètes, ouvrant la voie à l'ouverture sur les sciences, tout en évitant l'abstraction conceptuelle.
- Eviter une pédagogie "*frontale*" fondée sur des cours magistraux et la prise de notes par les apprenants, mais privilégier l'interaction entre l'enseignant et les élèves, et entre les élèves, tout en sachant résumer l'exercice par un bilan des acquis de la part des élèves.
- Encourager les activités de recherche des élèves (individuellement ou par groupe) sur des tâches de documentation, mais aussi de conception et de réalisation; cela peut favoriser la collaboration entre enseignants d'un même cycle ainsi que l'implication du chef d'établissement, s'il s'agit de domaines pluridisciplinaires.
- Privilégier sur quelques problèmes ou questions de société, ou encore qui interpellent les apprenants, l'interdisciplinarité, afin de faire comprendre la complexité des sujets et, ainsi, combiner la démarche de réflexion, d'esprit critique et d'investigation, avec l'acquisition de connaissances.
- Pratiquer une pédagogie active, c'est aussi chercher à développer les apprentissages à partir d'ateliers, d'activités de groupe et de projets faisant intervenir des acteurs multiples; mais c'est aussi, progressivement, donner aux apprenants le goût des sciences tout au long de leur scolarité.
- Contribuer à faire comprendre aux apprenants le rôle des sciences (STEM) dans les autres enseignements, par exemple dans ceux des lettres, des sciences sociales et humaines, et ainsi, l'apport des

sciences à l'histoire des idées (exemple de savants, d'artistes, d'architectes, d'hommes ou de femmes de lettres, ayant réussi à faire le lien entre les sciences et les autres domaines de la connaissance).

B. Construction des curriculums

Ces derniers devront être élaborés en fonction des recommandations qui précèdent ou sur leur base, qu'il s'agisse d'un enseignant ou de plusieurs, selon le cycle d'enseignement.

Les curriculums doivent veiller à l'acquisition par les apprenants, à l'issue d'un cycle d'enseignement, de capacités d'observation, d'analyse, d'évaluation, d'esprit critique, mais aussi de savoirs ou d'apprentissages, sur lesquels seront fondées leurs études ultérieures ou l'entrée dans le monde du travail.

Les curriculums doivent encourager la collaboration, avec l'aide des chefs d'établissements ou des directeurs d'académies, entre les enseignants, afin de favoriser l'interdisciplinarité et prendre conscience de la complexité de la connaissance (éviter le réductionnisme).

Les curriculums doivent pouvoir être évalués en fonction des capacités des apprenants à l'issue de chaque cycle ; par exemple, savoir lire, écrire, compter, à la fin de l'enseignement primaire ; et cela de façon solide et pour toute une classe d'âge, afin de pouvoir fonder sur des bases solides des enseignements ultérieurs.

C. Formation initiale et continue des enseignants

- Faire adhérer les enseignants aux objectifs de la vision stratégique de la réforme de l'école marocaine : "qualité, égalité et inclusion sociale de l'ensemble du système éducatif". Leur faire comprendre leur rôle crucial dans cette réforme nationale et leur implication dans son évolution et son succès.
- Expliciter la mise en œuvre d'une pédagogie active en faveur d'un enseignement des sciences, avec des principes, des méthodes et des matières (connaissances).
- Montrer que cette pédagogie active est associée à des méthodes d'évaluation de la formation des enseignants.
- Renforcer la formation des enseignants en matière de culture scientifique, depuis l'enseignement primaire, mais aussi introduire dans la formation des enseignants non scientifiques (langues, humanités, arts) des éléments de cette culture, favorisant en cela une osmose entre tous les enseignants vers un objectif commun : la qualité de l'école marocaine, mais aussi l'équité pour y accéder et y réussir (quelles que soient l'origine sociale des élèves et leurs difficultés d'apprentissage).
- Favoriser l'interdisciplinarité dans la formation des enseignants (au moins jusqu'au collège), par exemple en regroupant les sciences expérimentales et les sciences formelles (mathématiques et sciences numériques).
- Mettre en place, ou renforcer, au cours de la formation des enseignants les réseaux pédagogiques réunissant les acteurs de l'enseignement (par exemple, via des rencontres, des sites internet ou des

projets pédagogiques communs sur des thèmes précis).

- Envisager les modalités de participation d'étudiants du premier cycle de l'enseignement supérieur à l'encadrement des élèves, en parfait accord avec les enseignants eux-mêmes, et en particulier pour aider les élèves ayant des difficultés (rattrapage, suivi personnel après les heures de classe, tutorat), ou pour assister les enseignants dans leurs travaux de démonstration expérimentale. Une telle association pourrait inciter certains de ces étudiants à épouser la carrière de l'enseignement.
- Attacher une importance particulière à la formation à l'utilisation de ressources pédagogiques ludiques dont les écoles devraient être équipées (surtout dans le pré-scolaire et le primaire), ou renforcées.
- Encourager, tout au long de la formation des enseignants, les expériences pédagogiques innovantes, la capitalisation des bonnes pratiques et des expériences, les partages en réseaux, la mise en commun des ressources et de savoir-faire via des laboratoires ambulants ou des outils (mallettes pédagogiques, par exemple).

D. Mesures d'accompagnement et d'inclusion sociale

- Valoriser moralement et matériellement les métiers et les activités scientifiques ; combattre l'image du scientifique travaillant dur et mal payé dans une société saturée de publicité consumériste. Communiquer auprès de la société et du grand public pour une vision positive des sciences et une meilleure compréhension de l'enseignement des sciences et des bienfaits de cet enseignement.
- Encourager les démarches participatives consistant à associer des représentants de tous les acteurs. Dialoguer, dès la phase amont, avec les enseignants, les institutionnels de l'éducation, les associations de parents, et les éventuels acteurs clefs de la société civile. Partager les enjeux et de la vision ; échanger sur les difficultés concrètes et les véritables freins pour une co-conception des solutions adaptées à chaque contexte. Accompagner le changement par des animateurs sociaux formés spécifiquement pour instaurer un dialogue positif et lever les difficultés qui apparaissent en cours de route.
- Associer étroitement les familles au projet pédagogique de l'école et à la démarche conjuguant les principes, les méthodes et les matières scientifiques.
- Inciter les municipalités et les collectivités régionales à investir dans des actions de diffusion de la culture scientifique sous diverses formes : musées et parcs des sciences, événements réguliers ou focalisés, expositions, conférences, et projections gratuites pour les jeunes et le grand public.
- Mobiliser les entreprises dans l'effort national de formation scientifique, encourager leurs actions de parrainage d'écoles, de partenariats sur des projets généraux ou relatifs aux activités ou à l'environnement de l'entreprise, d'offre de stages, et de tutorats de groupes et de projets par les cadres de l'entreprise. Mobiliser les associations culturelles, sportives, de quartiers, et les comités sociaux des entre-

prises, soutenir leurs initiatives de clubs et de camps de vacances scientifiques, d'animation sur des événements scientifiques.

- Promouvoir une semaine de la science (début d'octobre) par de nombreuses initiatives et portes ouvertes des laboratoires, des entreprises, des écoles et lycées, et activités destinées aux jeunes et au grand public. Sensibiliser aux enjeux de l'amélioration de l'enseignement des sciences et ainsi qu'aux défis collectifs pour y arriver, par une mobilisation d'organes publics, de fondations, de centres de recherche, d'universités, d'ONG et d'entreprises.
- Faire de la Journée mondiale de la science pour la paix et le développement (10 novembre) un événement national, donnant une large visibilité aux élèves et acteurs de l'enseignement des sciences.

1 Introduction

1.1 Contexte de cette contribution

A l'initiative du Ministère de l'Education Nationale du Maroc, une réflexion est menée sur l'orientation à long terme de l'enseignement des sciences, des technologies, de l'ingénierie et des mathématiques. Cette réflexion prolonge les recommandations du Conseil supérieur de l'enseignement, de la formation et de la recherche scientifique (CSEFRS) relatives à la réforme 2015-2030 [16]. Un groupe de travail informel, sous l'égide de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, fut chargé de contribuer à cette réflexion.¹

Les travaux de ce groupe de réflexion sur l'enseignement des sciences au Maroc se sont déroulés entre juin 2016 et mars 2017. Ils se sont concrétisés sous forme de discussions, de partage de documents et de contributions écrites. Une première version de ce document fut soumise à l'Académie Hassan II au printemps 2017. Les retours constructifs, écrits et lors d'une session ordinaire de l'académie ont permis d'enrichir la réflexion et de parvenir au présent rapport.

Le reste de cette introduction donne brièvement le périmètre de la réflexion, son cahier des charges et les limites de sa contribution. Elle esquisse comment pourraient être mis à profit des éléments de cette contribution qui seraient éventuellement retenus par les pouvoirs publics. La [section 2](#) rappelle les finalités de l'enseignement des STEM. La [section 3](#) fait l'état des lieux et évoque les leviers d'action possibles. La [section 4](#) propose une vision globale sur l'enseignement des sciences, vision qui articule des *principes*, des *méthodes* et des *matières*. La [section 5](#) argumente en faveur de la mise en place d'une pédagogie active pour l'enseignement des STEM. Un récapitulatif des recommandations est proposé en [section 6](#). Trois annexes illustrent et détaillent les analyses générales qui précèdent sur l'enseignement des sciences du vivant, des mathématiques et statistique, et des sciences numériques.

1.2 Périmètre de la réflexion

1.2.1 Périmètre éducatif

Ce rapport s'intéresse aux cycles d'enseignement pré-scolaire, primaire, secondaire, collège et lycée, et de façon plus restreinte, au premier cycle du supérieur. Il s'agit des 15 années essentielles de formation qui amènent une jeune personne jusqu'à la maturité de ses capacités cérébrales et cognitives, qui lui apportent les moyens nécessaires pour apprendre à apprendre et à évoluer.

1. Groupe composé des personnes suivantes : Mohammed Cherkaoui, Rajae Cherkaoui, Rajae El Aouad, Abdelhaq El Jai, Nadia El Kissi, Abdeljabbar El Manira, Malik Ghallab, Nadia Ghazzali, Driss Ouazar, Albert Sasson, Wafa Skalli, et Mohammed Smani.

Une réflexion sur l'enseignement des sciences ne peut se restreindre aux seuls établissements formels d'enseignement et aux instituts de formation des formateurs. Elle doit prendre en compte le contexte social et familial, ainsi que toutes les structures qui contribuent à la formation des jeunes, telles que les clubs éducatifs et sportifs, les centres de vacances, les musées et maisons des sciences, mais également les entreprises, à tous les niveaux d'accueil, de stage, d'initiation et de formation professionnelle. Une réforme de cet enseignement doit s'appuyer sur un effort de communication large auprès de toute la société dans les médias populaires, dont la télévision. Elle doit utiliser tout le spectre des ressources numériques, très riches sur les sciences et largement accessibles.

1.2.2 Périmètre thématique

Ce rapport traite de *l'enseignement des sciences, des technologies, de l'ingénierie et des mathématiques*. Généralement désigné sous le sigle des STEM, ce périmètre focalise dans de nombreux pays des efforts éducatifs et une stratégie de formation très volontaristes (cf. par exemple [33]). Nous en évoquerons les raisons en section suivante.

Bien entendu, une réflexion sur l'enseignement des sciences ne peut être abordée que dans le cadre d'une vision systémique et cohérente de l'ensemble des composantes de formation de l'enfant. Il s'agit de l'acquisition des *fondamentaux* qui en feront un adulte responsable et épanoui :

- *apprendre à s'informer, s'exprimer et raisonner* ;
- *apprendre à apprendre, à faire, à être et à vivre ensemble* ;
- se percevoir correctement dans le monde comme être conscient, étroitement *solidaire et interdépendant de son environnement* humain, social et bio-physique.

L'enseignement des sciences doit viser à être un vecteur essentiel pour l'acquisition de ces fondamentaux par *tous* les jeunes. L'acquisition de compétences spécifiques aux STEM, pour ceux que cet enseignement motivera en vue d'une carrière scientifique et technique, est bien entendu un objectif essentiel. Mais cet objectif est plus efficacement et naturellement atteignable pour une large proportion de jeunes via le rôle formateur, pour tous les élèves, dans l'acquisition des fondamentaux par la démarche scientifique.

Par ailleurs, la focalisation sur les STEM ne constitue pas un cloisonnement disciplinaire. De plus en plus de travaux dans les sciences humaines et sociales (SHS), par exemple en économie, démographie ou sociologie, adoptent une démarche similaire à celle des STEM. Elles élaborent et valident leurs modèles sur des observations extensives et des masses de données qui permettent une compréhension et éventuellement des prédictions analogues à celles des autres champs scientifiques. Les possibilités d'expérimentation sont généralement réduites en SHS, mais la simulation numérique ouvre par-

fois quelques perspectives intéressantes. Les SHS ont des particularités qui doivent être appréhendées, au niveau de l'enseignement dans ces domaines, de façon plus spécifique.

1.2.3 Horizon temporel

Les perspectives évoquées ici se situent à long terme. Il s'agit de proposer des objectifs et des méthodes visant un état désirable de l'enseignement des sciences au Maroc à partir de 2030, en particulier en prolongement des recommandations du CSEFRS pour la période 2015-2030 [16].

Le temps de latence d'une réforme de l'enseignement est très long (parfois estimé à 40 ans). A cette dynamique sociale lente s'oppose une dynamique d'évolution des connaissances, y compris celles des sciences de l'éducation, très rapide. Des méthodes définies aujourd'hui peuvent devenir rapidement obsolètes. Les suites éventuelles à donner aux recommandations de ce rapport doivent donc se situer dans un processus dynamique de mise à jour et d'affinement.

1.3 Limitations

Les travaux supportant ce rapport, limités dans le temps et dans leur portée, ne visent certainement pas à proposer des curricula détaillés et encore moins une démarche précise pour le déploiement effectif de tels curricula dans les établissements scolaires du Maroc. Ce document n'est pas un *modus operandi* pratique d'une réforme, mais la proposition de *perspectives* qui pourraient guider la définition de cette réforme. On souhaite affirmer ici les principes qui semblent s'imposer aujourd'hui pour la formation par la démarche scientifique et l'enseignement des sciences. On vise, via ces principes, à éclairer des perspectives désirables pour l'établissement des curricula d'enseignement et leur éventuelle mise en œuvre progressive.

Les perspectives évoquées restent relativement générales. Cependant, quelques exemples simples sont proposés², principalement à titre d'illustration, parfois visuelle, de ce que pourrait être une approche ludique et concrète de la formation par la démarche scientifique. Le message à retenir sur tous ces exemples, est qu'il est plus important de poser des questions et de laisser l'apprenant comprendre par l'expérimentation, que de lui apporter des réponses toutes faites (les questions sont bien entendu à adapter en fonction de l'âge).

Ce rapport s'appuie sur une documentation substantielle (à laquelle ce texte renvoie), constituée d'études générales, spécifiques ou comparatives, et de travaux de recherche, en particulier en science de l'éducation. Cependant,

2. De très nombreux exemples pédagogiques similaires sont disponibles sur internet, par exemple [63, 64, 65].

ce document ne vise pas à proposer des contributions de recherches originales en science de l'éducation, spécifiques au contexte social et éducatif du Maroc.³ Il s'agit de présenter une vision et des recommandations destinées à enrichir la réflexion des acteurs du système éducatif engagés dans les réformes en cours au Maroc.

1.4 Mesures pour donner suite à ce travail

Les perspectives défendues ici nécessitent d'être affinées et précisées en curricula et actions éducatives concrètes, constamment évaluées et actualisées. Nous préconisons quelques mesures pour donner éventuellement suite à ces propositions :

1. Organisation d'ateliers de travail sur l'enseignement des STEM au cours desquels les responsables du système éducatif national, en dialogue avec des représentants des enseignants et des différents acteurs, arrêteraient, sur la base de toutes les contributions disponibles, dont celle-ci, les principes et les objectifs retenus, ainsi que les grandes lignes de leur mise en œuvre progressive. L'Académie Hassan II pourrait sans doute contribuer à ces ateliers.
2. Mise en place de groupes de travail des acteurs de l'éducation à tous les niveaux pour affiner ces perspectives en curricula, en méthodes et ressources éducatives, en critères d'évaluation de l'enseignement et de la réforme elle-même, en programmes de formation des enseignants, en éléments permettant aux structures para-scolaires et à la société civile de contribuer à la réforme et en actions de communication vers les familles et la société. Ces mesures se situent clairement dans le cadre des recommandations du CSEFRS, en particulier celles relative au Comité permanent de rénovation et d'adaptation continues des programmes et des méthodes.
3. Incitation à la mise en place d'expériences éducatives, de recherches et de développements de techniques pédagogiques, en particulier liées à la didactique des sciences, permettant d'approfondir les principes retenus et de les décliner en une diversité d'initiatives adaptées aux motivations et contextes locaux.

Les recommandations relatives aux perspectives proposées sont discutées tout au long du rapport et résumées en [section 6](#) .

3. L'Académie Hassan II encourage et pourrait éventuellement soutenir de tels travaux, mais il n'est pas dans ses missions de les mener.

2 Motivations et objectifs

2.1 Rôle de l'école

Les finalités de l'enseignement des sciences sont à situer relativement à celles plus larges de l'école. La question “*pourquoi l'école ?*” est longuement traitée dans les propositions du CSEFRS [16]. Dans le sens de ces propositions, soulignons ici que la réponse traditionnelle, “*l'école sert à transmettre le savoir*”, est réductrice. Elle conduit à privilégier l'acquisition de connaissances, en pratique assimilées et retenues par très peu d'élèves, à l'acquisition de compétences essentielles pour tous.

L'école est une institution sociale critique pour la *formation de l'enfant*, dans tous les sens du terme et pour son épanouissement en adulte. Elle répond à deux types d'impératifs fondamentaux :

- Des *impératifs biologiques*. L'*Homo sapiens* a acquis par évolution des aptitudes cognitives remarquables, mais le cerveau de son nouveau-né nécessite deux bonnes décennies et un contexte favorable pour parvenir à maturité. C'est en particulier le cas des connexions synaptiques cérébrales qui se développent et se renforcent sur une période allant de douze ans jusqu'à bien après vingt ans [27].
- Des *impératifs sociaux*. L'humain est un être social qui communique, collabore et vit en interdépendance avec d'autres. Son adaptation sociale nécessite l'acquisition des aptitudes nécessaires à la vie en groupe. L'organisation sociale est de complexité croissante. Elle exige du citoyen, impliqué et responsable, une formation et de réelles compétences. Vivre heureux est presque toujours lié à un sentiment d'utilité au groupe. Ceci requiert des valeurs morales, mais aussi des capacités d'interaction, de raisonnement et d'adaptation à un monde en évolution rapide. Ces capacités sont nécessaires pour enraciner les valeurs morales en convictions profondes et les traduire en comportements sains.

L'école est le reflet de l'état présent de la société. Elle est aussi son instrument majeur et critique pour préparer son avenir. *La science est le meilleur vecteur de formation des hommes et des femmes qui feront cet avenir.*

2.2 Rôle de l'enseignement des sciences

Le réponse à cette question conjugue des exigences de *formation humaine pour tous par la démarche scientifique* et des objectifs de formation des futurs cadres et praticiens scientifiques, nécessaires aux besoins légitimes de développement du pays. Discutons des raisons et de l'articulation de ces deux finalités.

La démarche scientifique. La science est un fruit de civilisation. Un fruit relativement tardif, qui apparaît à l'antiquité après l'invention de l'écriture⁴, qui s'est développé et enrichi progressivement avec des contributions de nombreuses civilisations, dont la civilisation arabo-musulmane. La science traduit les spécificités cognitives et d'interaction de l'homme, son besoin naturel de comprendre et d'expliquer, en une démarche qui l'éclaire, qui aborde avec exigence quelques unes de ses questions. La science est un questionnement permanent plutôt qu'une collection de certitudes immuables et dogmatiques. C'est un questionnement qui affine progressivement notre compréhension du monde et dont la pratique nous forme et enrichit notre humanité individuelle et collective.

La démarche scientifique révèle et cultive les aptitudes et qualités de l'humain : sa curiosité naturelle, son enthousiasme, son émerveillement et sa sensibilité aux beautés du monde. C'est une démarche qui éveille et aiguise ses sens pour l'observation fine, son imagination et sa créativité à élaborer des constructions intellectuelles et matérielles admirables, son engagement et sa persévérance à poursuivre une quête libre et passionnante. C'est aussi une démarche qui apprend l'écoute, la rigueur, la logique et la valeur de l'erreur. Elle cultive l'humilité face à ses propres limitations, à la complexité du monde et au large champ d'inconnus, dont la frontière croît avec nos connaissances. C'est une démarche qui conduit à différencier les faits avérés des opinions relatives, à distinguer les connaissances des croyances⁵. Elle conduit à chérir la vérité, l'exactitude et la cohérence dans les domaines qui relèvent de la science, car tout n'est pas matière à science, et à accepter avec tolérance les croyances, opinions, préférences et critères d'autrui pour ce qui n'en relève pas. Elle forme notre perception de citoyens du monde, étroitement solidaires⁶. Les vertus que développe la pratique de la science et ses valeurs sont universelles ; elles sont essentielles à la société et dépassent largement les besoins de la seule pratique scientifique.

Proposons une métaphore pour souligner l'importance de la formation par la science. L'évolution biologique a doté tout être vivant de gènes complets pour le développement et l'entretien de son organisme. De son côté l'évolution culturelle a apporté à l'humain des *mêmes*⁷ tout aussi fantastiques pour le développement de ses capacités cognitives. Mais ces mêmes ne se forment pas spontanément comme les gènes dès la conception du fœtus.

4. Alors que les techniques – par exemple l'agriculture, la roue, ou la métallurgie – remontent au néolithique, voire bien plus tôt pour la maîtrise du feu ou de la pierre taillée.

5. Une connaissance est une croyance vraie et *justifiée*. Cette distinction, qui remonte à Platon, mérite d'être approfondie et bien comprise.

6. La science, dit-on, n'a pas de frontière ; les problèmes et les défis de l'homme aujourd'hui n'en ont pas davantage. "On demandait à Socrate d'où il était, il ne répondait pas d'Athènes, mais du monde" [39].

7. Ce terme, due au biologiste Dawkins [17] et au philosophe Dennett [18], désigne l'évolution des concepts humains.

Ils doivent être acquis, en particulier grâce à l'école, par l'imitation, l'exercice et la pratique. Faillir à en doter un jeune serait du même ordre que de le couper par isolement de l'acquisition de la langue et conduirait à un appauvrissement de ses facultés.

La science dans les matières d'enseignement. Très jeune, l'enfant fabule et raconte des histoires qui nourrissent son imagination. Très jeune aussi, il observe, compare et expérimente. L'attention aux effets observés d'une action sépare la réalité de l'imaginaire. Elle infirme l'erreur, valide une idée, tranche une controverse, alimente la créativité et enrichit l'enfant. L'expérimentation prolonge la curiosité naturelle en réponses possibles et en nouvelles questions. La *rétroaction* qu'apporte l'expérience est particulièrement formatrice. Elle constitue un vecteur privilégié d'apprentissage. La rétroaction est critique dans l'acquisition des capacités sensori-motrices de l'enfant, par exemple pour l'apprentissage de la marche ou de dextérités manuelle et corporelle. Elle est également essentielle pour le développement de ses capacités cognitives ; et elle est tout autant naturelle, car l'enfant expérimente très jeune et constamment. La boucle de rétroaction expérimentale, au coeur de la démarche scientifique, est éminemment vertueuse et formatrice. Elle doit être cultivée tout au long de l'enseignement du pré-scolaire à l'université.

Bien entendu, la formation par la démarche scientifique a pleinement besoin des valeurs et des qualités humanistes, à acquérir par la pratique des humanités et des arts, qualités auxquelles cette formation contribue. La science gagne également à être perçue comme composante essentielle de l'évolution de l'humanité, de son histoire et de ses valeurs. Elle doit faire partie de l'enseignement des humanités et des arts. Bien entendu, l'exigence de l'acquisition des langues, de l'expression orale et écrite des idées et des concepts est essentielle. Cette acquisition est étroitement imbriquée à la formation par la science, laquelle développe les capacités d'écoute, de débat, d'argumentation logique, de rhétorique, de formulation précise des faits et des idées.

Précisons, s'il en est besoin, que la démarche scientifique ne s'oppose en rien à la démarche spirituelle. Elle s'oppose aux superstitions et croyances obscurantistes, contredites par l'observation scientifique, mais *le questionnement spirituel est simplement hors du champ de la science*. La distinction entre connaissances et croyances s'accompagne d'une distinction, qu'il est important de bien à discerner, entre les questions qui relèvent du champ de la science de celles qui n'en relèvent pas (cf. [sous-section 4.1](#)). Former les jeunes à appréhender le monde par la démarche scientifique ne conduit pas à plus de superficialité, mais au contraire, à plus d'intelligence de coeur et d'esprit.

Formation par la démarche scientifique et réponse aux besoins sociaux. La formation de très nombreux jeunes marocains aux sciences est une condition essentielle de développement humain et social du pays. Cette formation permettra de faire bénéficier la société des bienfaits scientifiques et techniques, en termes de santé, d'environnement, de production, d'organisation et de bien être. Par ailleurs, la formation d'une élite d'excellents scientifiques, en mesure de contribuer aux progrès futurs de la recherche et de l'innovation, est une exigence pour avancer vers une société de la connaissance et préparer l'avenir, en particulier par l'enseignement supérieur et la formation des formateurs. L'ambition du Maroc est de “*passer d'une société de consommation du savoir à une société qui le produit et le diffuse*”, comme le rappelle le CSEFRS [16]. Cet objectif ne peut être atteint que par la présence sur la ligne de front de la recherche et de l'innovation mondiales de nombreux jeunes marocains, qu'il s'agit donc de former pour cela. Ces objectifs, essentiels pour l'avenir de notre pays (voir [section 3](#)), doivent rester un sujet constant de mobilisation et d'attention.

Cependant, orienter l'enseignement des sciences exclusivement vers la satisfaction de ces objectifs, comme cela est fait dans de nombreux pays, se révèle être une erreur contreproductive. Cette approche traditionnelle conduit généralement à définir un ensemble de connaissances à enseigner à l'année n en fonction des *besoins* des années suivantes, du cycle suivant, de l'examen à venir, voire du métier auquel on se prépare. Très peu de ces connaissances perdurent⁸, et la démarche qui a permis de les découvrir ou de les justifier est généralement ignorée car elle n'a pas été suffisamment enseignée. L'approche souffre de plusieurs défauts :

- Elle met l'accent sur une vision *quantitative* de matières scientifiques, vision largement obsolète qui transforme l'enseignement en une course à boucler le programme.
- Elle néglige l'extraordinaire *dynamique* des savoirs et des métiers ; peu des métiers que pourra exercer l'écolier dans 20 ans existent aujourd'hui ou perdureront dans leur état actuel.
- Elle introduit trop tôt des concepts et des modèles *trop abstraits* qui rebutent la majorité des élèves, les éloignent d'un domaine perçu comme trop ardu et nécessitant trop d'efforts.
- Elle fait de l'enseignement de la science un moyen de *sélection* par l'échec qui déstabilise et réduit la confiance en soi de l'apprenant.

Les résultats de cette approche traditionnelle, très insuffisants en formation de scientifiques, sont largement documentés. Par exemple, un rapport européen [25] relève que les enfants abordent l'école avec une grande curiosité

8. Le lecteur est invité à faire un petit sondage dans son entourage. Par exemple, combien d'adultes ayant suivi un cursus de physique au lycée répondent correctement aux questions élémentaires de la [Figure 11](#). Il serait très instructif de faire passer les tests de TIMSS [11] à un échantillon d'adultes bacheliers.

pour la science, mais moins de 50% au collège maintiennent cet intérêt pour la science qui leur est enseignée et moins au 10% au lycée! L'ouvrage [29], s'appuyant sur plusieurs études (et des rapports officiels, e.g., [54]) nous apprend que la majorité des élèves s'ennuie à l'école, rebutée par un enseignement trop abstrait, cloisonné, et sans lien avec leurs préoccupations, y compris scientifiques. On oublie généralement que de beaucoup de découvertes scientifiques naissent d'observations très concrètes avant d'évoluer vers une formalisation abstraite. De nombreuses savoirs scientifiques peuvent être enseignés en termes très concrets (cf. les exemples qui suivent). Sauf pour une petite minorité d'élèves, les capacités d'abstraction s'acquièrent très lentement et nécessitent des métaphores et des supports visuels et mentaux concrets qui enrichissent l'abstraction.

Au déficit en spécialistes, l'approche traditionnelle rajoute comme effet négatif une inculture sociale de la science, préjudiciable sur de nombreux plans. L'élitisme qui en résulte enferme les scientifiques et la science dans un ghetto opaque, peu compréhensible au citoyen moyen, lequel ne peut plus légitimement intervenir, comme il le doit, dans le choix des critères et orientations de la science, et dont il se méfie de plus en plus. Enfin, soulignons que pour un pays en développement, une formation élitiste alimente d'abord les laboratoires internationaux les plus attractifs, au lieu de contribuer au développement national.

Il résulte de ce qui précède que les objectifs de formation de nombreux jeunes aux STEM, nécessaires au développement du pays, ne sont réellement atteignables que par une formation large de *tous* les jeunes marocains par la démarche scientifique. La finalité fondamentale de l'enseignement des sciences que nous préconisons est de former très largement tous les marocains de demain en citoyens pleinement conscients, épanouis et responsables de leur humanité.

L'enseignement de la science se doit d'abord et avant tout de forger l'intelligence de l'enfant, son jugement et son caractère par la pratique et la fréquentation assidue d'une démarche éminemment formatrice. Cet enseignement est fondamental pour la formation humaine, pour apprendre à apprendre, à faire et à vivre ensemble.⁹ En favorisant le questionnement fertile, la créativité et les démarches rigoureuses, on renforce le potentiel des jeunes de demain sur tous les plans. Les services publics, les entreprises et l'ensemble de la société bénéficieront ainsi de ressources humaines compétentes et qualifiées.

Former tous les jeunes par la démarche scientifique est un objectif essentiel, mais qui semble difficile à atteindre, car il se heurte aujourd'hui à plusieurs difficultés, par exemple :

9. *Apprendre à apprendre* fait référence à l'acquisition de compétences méthodologiques permettant d'aborder un nouveau sujet, une matière à étudier, une habilité ou un savoir-faire à maîtriser, permettant d'apprendre intelligemment et efficacement ; cette notion est couverte par une documentation très abondante, e.g., [66, 85].

- il est plus simple de professer des définitions et des connaissances toutes prêtes et formatées, dont on demande la mémorisation pour l'examen, que de faire acquérir des processus ouverts de questionnement, d'expérimentation et de recherche de solutions ;
- les enseignants des STEM ont eux même été formés selon l'approche quantitative ; ceux des autres matières et ceux du primaire ont très peu, voire aucune formation à la démarche scientifique ;
- les familles en mesure d'accompagner la scolarité de leurs enfants sont généralement dans la même situation ; elles se retrouvent privées du cours classique qui permet d'aider l'enfant et de suivre ce qu'il a mémorisé.

Bien identifier ces difficultés est indispensable à leur dépassement.

En conclusion de cette section, il est important d'insister sur l'urgence d'une réforme ambitieuse de l'enseignement des sciences au Maroc, enseignement aujourd'hui largement déficient, comme analysé en section suivante.

3 Situation et leviers d'action

Les sciences visent à observer, analyser et comprendre les phénomènes qui régissent le monde qui nous entoure. Les mathématiques sont associées à la capacité d'abstraction et de raisonnement logique, permettant de modéliser les phénomènes en présence. La technologie et l'ingénierie constituent un moteur pour la transformation féconde des connaissances scientifiques au service de solutions permettant d'améliorer l'environnement et d'engendrer un progrès économique et sociétal. La démarche scientifique et le goût de la recherche renforcent la curiosité, l'imagination, la créativité, mais aussi la rigueur et la précision.

L'enseignement des STEM, basé sur des pédagogies actives, a toute sa place, de la maternelle à l'université. Il permet à l'enfant puis au jeune de renforcer tout naturellement ses fondamentaux (lire, écrire, compter), et, par la pratique de la méthode scientifique, de développer des compétences plus large de savoir s'informer, s'exprimer et raisonner.

Dans cette démarche, en plus du savoir acquis, l'enfant développe des compétences essentiels pour une vision du monde plus riche et intéressante, tels que la confiance en soi, la ténacité, le sens du travail en équipe, et la capacité de rechercher des solutions technologiques à des problèmes dont la complexité évolue avec de développement de l'enfant et du jeune.

Rêvons au Maroc de 2030, qui serait basé sur une société du savoir :

Le Maroc constitue un hub régional en matière de recherche scientifique et d'innovation. Les entreprises marocaines sont nombreuses, capables d'innovation de rupture, et les entreprises étrangères s'installent au Maroc car la richesse intellectuelle de ce pays est reconnue. Des cadres supérieurs et intermédiaires aux employés à différents niveaux, le personnel est qualifié et efficace. L'entreprise est généralement caractérisée par un haut niveau de confiance avec une démarche qualité où rigueur, pragmatisme, et plaisir collectif du travail bien fait sont dominants. Le Maroc a su tirer pleinement parti des nouvelles technologies pour identifier des créneaux de niches dans lesquels des avancées drastiques ont été réalisées, dans le respect de l'environnement et de l'humain.

La société marocaine est une société de la connaissance : des grandes villes aux villages les plus reculés, le mot d'ordre de traduire l'ijtihad par la construction d'écoles et d'universités ouvertes sur la vie, au service du développement, a permis de mettre en relief la créativité de tous. L'enseignant est particulièrement respecté, parce que son rôle essentiel dans le devenir de la nation est perçu par tous, et parce que cette reconnaissance et cette confiance l'engagent vers un haut niveau d'exigence : il sait, et il transmet aux jeunes dont il a la charge, que l'effort, la ténacité, la curiosité et la confiance en soi sont essentiels pour arriver à des résultats dont on est fiers.

Une réelle synergie existe entre tous les acteurs de l'éducation : Ministère, parents d'élèves, entreprises, société civile, chacun a pleinement joué son rôle pour transformer le paysage éducatif. L'époque où l'éducation était LE grand point faible n'est évoquée que pour mesurer fièrement le chemin accompli : en pleine synergie, intégrité, intelligence collective et énergie ont porté leurs fruits.

Nous n'en sommes pas tout à fait là, malheureusement loin s'en faut. Mais c'est notre vision, et notre défi est de rechercher comment y arriver. Théodore Monod nous rappelle qu'*“une utopie est un projet réalisable, qui n'a pas encore été réalisé”*, et Nelson Mandela que *“cela paraît toujours impossible jusqu'à ce que ça soit fait”*. Comme chercheurs, nous savons que *“pour qu'un rêve se réalise, il faut d'abord la capacité de rêver . . . et de la persévérance”*!

Alors : de quelle situation partons-nous, et comment faire pour arriver où nous voulons ?

3.1 Etat de l'enseignement des sciences au Maroc

Comme dans beaucoup de domaines, le Maroc est aussi un pays de contrastes concernant la science et la technologie. Une petite élite bénéficie d'une formation d'excellence. A titre d'exemple pour la session 2015, 583 étudiants des classes préparatoires au Maroc ont été admis aux concours d'entrée dans les prestigieuses grandes écoles françaises [67]. Malheureusement, la situation moyenne est alarmante. Plusieurs indicateurs le démontrent, dont l'enquête “Trends in International Mathematics and Science Study” (TIMSS) [11], qui est un benchmark réalisé tous les 4 ans sur les compétences des élèves en mathématiques et en sciences. Bien que le Maroc ait progressé depuis le rapport 2011, les scores des enfants marocains sont inférieurs à 400 points, alors que la moyenne mondiale est de 500 points, les pays les plus avancés étant à plus de 600 points. Les figures 1 et 2 montrent la position de notre pays en deuxième année du secondaire, en sciences et en mathématique.¹⁰

Ces résultats nous interpellent : ils sont directement liés à la qualité de l'enseignement dans le primaire, qui est encore un véritable talon d'Achille, malgré l'investissement dans l'éducation et un volontarisme politique fort. Selon le rapport UNESCO 2014 sur l'éducation, moins de 50 % des enfants marocains sont capables de lire une simple phrase à la fin du primaire [20].

Bien entendu, il faut rester prudent sur l'interprétation de ces enquêtes.¹¹ Cependant, la convergence des constats démontre une situation préoccupante. Ce sont des pans entiers de notre jeunesse qui ne sont pas outillés pour répondre aux enjeux d'un monde qui avance de plus en plus vite, ce qui en fait des cibles vulnérables pour des discours obscurantistes. Le déficit en éducation, et particulièrement en éducation aux sciences, est un frein

10. Ces enquêtes portent sur des connaissances de base en STEM. La formation par la démarche scientifique est sans doute encore moins développée dans notre pays.

11. Voir en particulier l'analyse critique de [57, 58].

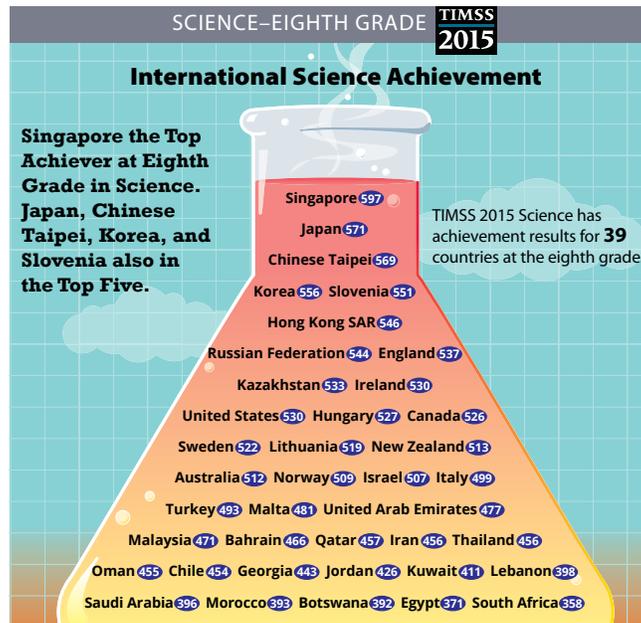


FIGURE 1 – Scores et classement du rapport TIMSS 2015 en sciences

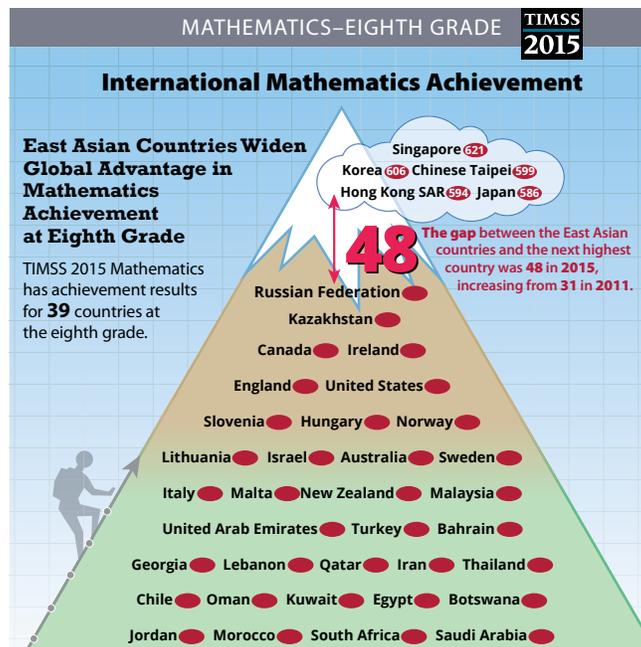


FIGURE 2 – Scores et classement du rapport TIMSS 2015 en mathématiques

majeur au développement du pays. Les raisons du déficit sont complexes et multiples : classes surchargées, enseignants insuffisamment formés ou motivés, environnement social ou familial défavorable, etc.

Comment mettre la science à la place qui devrait être la sienne dans la société ; comment favoriser l'intérêt, dès le plus jeune âge, des filles et garçons pour la science et renforcer leur appétence pour la démarche scientifique ?

Comment, dans un environnement qui est nécessairement contraint en ressources envisager un système d'éducation aux STEM, qui permette un accès équitable à la science, y compris pour les plus démunis ou vulnérables, de manière à ce que le Maroc ne laisse plus se développer des poches d'ignorance et d'obscurantisme ?

L'analyse des démarches et expériences au niveau international est essentielle pour identifier quelques clefs fondamentales pour une progression rapide. L'un des faits saillants des enquêtes TIMSS et PISA (Programme international pour le suivi des acquis) est la domination des pays asiatiques. Le rapport PISA souligne que seuls le Canada, l'Estonie, la Finlande, Hong Kong, le Japon, Macao, Singapour et le Viêt Nam comptent 90% d'élèves qui maîtrisent à 15 ans les "savoirs fondamentaux que chacun devrait posséder avant de quitter l'école". Cette situation met en exergue le défi que représente pour tous les pays, y compris pour certains des plus riches de l'OCDE, la réalisation de l'objectif de développement durable à l'horizon 2030, à savoir "assurer une éducation inclusive et équitable de qualité et promouvoir des possibilités d'apprentissage tout au long de la vie pour tous". Sans détailler les contextes très spécifiques de certains pays, il semble clair que la formation initiale et continue, la valorisation et l'évaluation des enseignants sont des points essentiels, mais également que les méthodes éducatives jouent un rôle crucial.

Certains pays ont eu des expériences très positives avec des progrès rapides, tels que le Brésil, ou le Chili avec son programme ECBI [20]. D'autres exemples sont donnés par le projet européen Fibonacci "Learning through inquiry" [5] vise à la mise à l'échelle d'approches de type *La main à la pâte*, dispositif fondé par Georges Charpak [14], autour d'expérimentations scientifiques basées sur l'observation concrète de l'environnement direct. Les objectifs globaux de tels dispositifs sont la promotion de l'enseignement des sciences et technologies dans les écoles, la formation et l'encadrement des enseignants [3]. Dans le monde anglo-saxon les approches dites "Context-based Science-Technology-Society", associées à l'apprentissage des sciences à partir de problématiques concrètes, ont une efficacité et un intérêt démontrés pour une meilleure compréhension de la nature de la science [2, 37]. Par ailleurs, le réseau européen Eurydice fournit une information sur les systèmes éducatifs européens ; son rapport 2011 [15] concernant l'enseignement des sciences donne un excellent éclairage sur la diversité des politiques nationales, des pratiques et initiatives pour encourager la formation de partenariats scolaires avec l'objectif principal d'accroître l'intérêt pour les sciences.

De ces expériences ressortent quelques éléments fondamentaux. Concernant l'enfant, les recherches établissent la relation forte entre la performance de l'élève en sciences et des facteurs liés à son environnement, tels que :

- le milieu familial, mesuré par la quantité de livres ou l'utilisation de la langue d'apprentissage à la maison ;
- le plaisir apporté par l'apprentissage des sciences ;
- la confiance des élèves en leur aptitude à entreprendre des tâches efficacement et à surmonter les difficultés (capacités personnelles).

L'intérêt d'évoluer vers une pédagogie active, par l'investigation est largement souligné. Le défi est de repositionner l'élève, dès la maternelle, comme véritable acteur forgeant sa capacité de réflexion et de questionnement, son sens de la logique, son observation des phénomènes physiques, à partir de situations concrètes et de défis qui sont des bases pour conceptualiser et pour apprendre. Il s'agit, dans les classes, de :

- prendre en compte la curiosité des enfants et les questions qu'ils se posent ;
- chercher avec eux des éléments de réponse en expérimentant ;
- les faire parler et leur faire rédiger leur travail sur un cahier d'expériences, contribuant ainsi aux apprentissages fondamentaux (lire, écrire, compter, communiquer oralement).

Le rôle de l'enseignant est essentiel : malgré l'apport des nouvelles technologies, un excellent enseignant avec des méthodes traditionnelles obtiendra de meilleurs résultats qu'un enseignant médiocre avec un support technologique même important [83]. Les éléments clefs sont en particulier les suivants :

- la motivation de l'enseignant et son engagement, liés à sa rémunération mais aussi et surtout à la reconnaissance sociale de son rôle et au plaisir qu'il peut tirer d'un enseignement efficace ;
- la formation permanente et l'accompagnement du développement professionnel des enseignants pour qu'ils soient pleinement partie prenante d'une pédagogie active, laquelle demande une implication différente de celle basée sur la transmission à sens unique d'un savoir théorique et livresque ;
- la dynamisation sociale autour de l'enseignement des sciences et les synergies mises en place autour de véritables projets transdisciplinaires.

La qualité de l'éducation, et en particulier de l'éducation des sciences, est également liée à la synergie entre différents acteurs impliqués dans l'apprentissage des sciences : partenariats scolaires, centres d'éducation scientifique, associations, acteurs privés. Les Académies des Sciences, au Maroc et ailleurs, sont souvent impliquées dans la coordination et/ou l'organisation d'activités de formation et de diffusion de la culture scientifique. Des ONG, des fondations, ou des partenaires du secteur privé, industries et services, ont également un rôle important à jouer. L'enquête Wise [83] souligne que pour les entreprises, ne pas investir dans le soutien à l'éducation et l'apprentissage

des sciences coûte cher ultérieurement en termes de perte de compétitivité et de besoins de formation spécifique. La mobilisation de tous les acteurs autour de l'enseignement des sciences a conduit à différentes actions, dont par exemple les suivantes :

- Des partenariats entre organes publics, fondations, centres de recherche, ONG, entreprises privées pour un soutien aux méthodes d'enseignement basées sur l'expérience, et la promotion des sciences dans les écoles.
- Des laboratoires ambulants, tels le camion des Sciences en Belgique ou "Lab in a Lorry" au Royaume Uni, qui visitent les écoles, fournissant aux enseignants et aux élèves la possibilité d'effectuer des expériences, particulièrement dans les régions rurales sans accès facile à un centre scientifique.
- Des compétitions et concours de projets scientifiques éducatifs, comme le concours "European Union Contest for Young Scientists", ou le "Prix graines de science" en Norvège, qui récompense des écoles maternelles démontrant de bonnes pratiques pour stimuler l'exploration scientifique, la curiosité, l'émerveillement et la concentration des enfants.
- La mise à disposition de ressources numériques ouvertes. Ainsi, le site de la fondation *La main à la pâte* propose des ressources riches et variées à l'intention des enseignants [3]. Différents professionnels, enseignants, formateurs pédagogiques, étudiants, ingénieurs et scientifiques participent à l'élaboration des divers supports pédagogiques réalisés.

3.2 Leviers pour infléchir la situation

Ces quelques éléments de base permettent d'élaborer des recommandations concernant les leviers pour infléchir la situation. Une priorité pourrait être de favoriser la synergie sociétale en faveur de la science, avec par exemple les éléments ci-après :

1. *Créer des sites pilotes* par des démarches participatives dans des zones localisées où une dynamique préexiste (cf. Figure 3) ; mener des actions visant des progrès rapides, avec un objectif quantifié et un suivi serré permettant une adaptation aux difficultés rencontrées et une émergence d'expériences réussies pouvant être mises à l'échelle.
2. Mener des actions pour *renforcer les capacités et la motivation des formateurs et des enseignants pour l'apprentissage par l'investigation*, pour une pédagogie plus active et plus efficace.
 - Organiser des temps de réflexion avec les académies régionales d'éducation et de formation et les Ecoles normales supérieures et les différents acteurs autour de la thématique de l'enseignement des STEM : réfléchir aux freins actuels (classes surchargées, besoin de formation des enseignants, équipements spécifiques) et aux actions prioritaires pour l'amélioration des pratiques pédagogiques.



FIGURE 3 – L'exemple d'évolution du paysage éducatif dans la vallée d'Imlil illustre une belle réussite de démarche participative. Sur 10 enfants qui entraient à l'école en 2007 dans cette zone pauvre et enclavée d'El Haouz, seuls 4 finissaient le primaire, parfois sans maîtriser les fondamentaux. À l'initiative de deux ONG, Relais Instruction éducation Maroc et Aide et Action International, un projet a été conduit dans une démarche d'ingénierie de développement : ne pas faire "à la place de" mais "avec", accompagner les acteurs locaux et renforcer leurs capacités à agir efficacement. Une analyse de contexte a été suivie d'un séminaire de restitution face à 55 participants, du Gouverneur aux écolières, aux associations locales et aux institutionnels. Un travail de dynamisation sociale a été conduit auprès de plus de 600 villageois pour la sensibilisation à l'importance de l'éducation, et l'accompagnement des acteurs communautaires. L'axe préscolaire a été privilégié pour permettre d'aborder l'école par un lieu de proximité bienveillant, où la familiarisation avec l'arabe et l'apprentissage de la vie en groupe s'accompagne d'activités d'éveil adaptées. Le besoin de 24 classes préscolaires a été identifié. Des enseignants spécialisés ont été formés en partenariat avec l'académie régionale d'éducation et de formation (AREF). Aujourd'hui, 21 classes opérationnelles ont accueilli 2100 enfants, dont 1100 sont maintenant au primaire (50% de filles) avec de très bons résultats.

La dynamisation sociale et la responsabilisation de tous les acteurs pour un objectif commun a été une clef majeure de réussite. Dans chaque douar bénéficiaire, les villageois ont fait don du terrain pour la construction de la classe. Ils ont participé à la construction elle-même et à la création d'une association locale pour assurer la gestion. Du fait de l'expérience acquise, des capacités renforcées et de la confiance en soi engendrée par la réussite du projet, de nombreuses initiatives ont été conduites et traduisent l'impact indirect : Comités de Mères Educatrices pour le suivi des centres préscolaires, foyers de collégiennes, etc. Des défis majeurs subsistent, dont la pérennisation du fonctionnement pour assurer la prise en charge des frais courants et des salaires des éducateurs, et la qualité de l'enseignement en primaire pour que le bénéfice de l'éveil préscolaire ne se perde pas. Cette zone constitue un terrain fertile pour qu'une expérience pilote d'enseignement des sciences et par les sciences, du préscolaire au collège, puisse être menée à bien.

- Impliquer les chercheurs dans le transfert de leurs pratiques et savoirs depuis les laboratoires jusqu'aux enseignants des écoles et collèges et à leurs élèves. Ceci a été démontré avec succès, par exemple dans le réseau des centres LUMA en Finlande [68], et aux Pays Bas, où les lauréats d'un prix scientifique prestigieux sont associés pendant 6 mois à des équipes pédagogiques pour transformer leurs recherches en projets concrets pour des enfants de 9 à 12 ans [55].
 - Identifier et valoriser les bonnes pratiques : au travers de trophées, concours, médailles, et valorisations médiatiques, mettant en lumière les équipes pédagogiques, les établissements et les élèves les plus performants, et favoriser les échanges pour la diffusion de ces pratiques.
 - Saisir l'opportunité des technologies numériques (documents multi-média, simulations, impression 3D, etc.) pour favoriser de nouvelles pratiques d'enseignement des sciences et des technologies.
3. Favoriser la création de bibliothèques, médiathèques, camions de la science, etc., en particulier pour les enfants et jeunes qui n'ont pas un environnement favorable.

Compte tenu des défaillances de l'environnement de l'enfant en terme d'accès aux livres, des bibliothèques et des ressources pédagogiques numériques avec un fonds scientifique adéquat peuvent jouer un rôle important. Dans ce sens, différentes actions pourraient être conduites :

- Favoriser les initiatives d'acteurs associatifs, industriels ou institutionnels qui souhaiteraient soutenir leur région, avec des modèles de partenariats.
- Constituer (en lien avec les acteurs concernés) des listes type d'ouvrages et de ressources numériques (logiciels, sites éducatifs) de qualité concernant les sciences, à différents niveaux, pour simplifier les démarches de soutien.
- Re-dynamiser des partenariats pour favoriser les initiatives du type *La main à la pâte*, et impliquer les universités et autres institutions dans la création de mallettes pédagogiques adaptées au contexte.

De telles orientations peuvent impacter rapidement et de manière durable l'enseignement des STEM et l'attitude des différents acteurs autour de cet enseignement, pour des enfants plus performants et surtout plus riches d'une culture scientifique leur permettant d'observer et de penser leur environnement autrement, avec plus de confiance dans leur capacité à s'adapter, s'épanouir et contribuer à leur environnement.

4 Vision pour l'enseignement des sciences

La formation *par* la démarche scientifique nécessite d'être bâtie en couplant constamment trois dimensions portant respectivement sur :

- Les *matières* scientifiques ;
- Les *méthodes* et pratiques mises en œuvre par la science ;
- Les *principes* de la démarche scientifique.

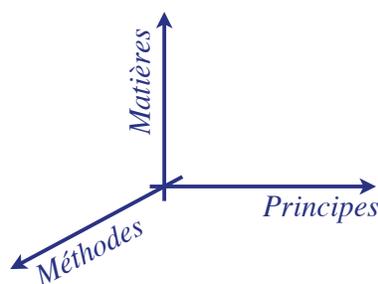


FIGURE 4 – Trois dimensions de la formation par la science.

Les matières enseignées ne sont pas les finalités premières et exclusives de l'enseignement, mais plutôt les vecteurs et supports concrets pour l'acquisition des méthodes et principes. Il importe moins de connaître la hauteur de la grande pyramide ou la masse de la terre que de comprendre les méthodes utilisées pour parvenir à ces informations. L'enseignement de ces données est un *prétexte* pour expliquer comment on peut en mesurer la hauteur sans escalader la pyramide, ou comment en obtenir la masse sans mettre la planète sur une balance.¹² Les méthodes pour ce faire ne sont pas des recettes immuables, à adopter les yeux fermés, mais s'appuient sur des principes d'homothétie, de proportionnalité et d'effets indirects, associés à des hypothèses, lesquelles sont à valider et à maintenir en perspective.

La vision que nous défendons de la formation humaine par l'approche scientifique ne sépare pas les sciences des techniques. En effet, comprendre la nature nécessite pour le scientifique une démarche de *conception* des instruments et des modèles nécessaires pour appréhender le monde. Cette démarche est similaire à celle de l'ingénieur. Innover et concevoir des artefacts nécessite pour l'ingénieur un effort d'investigation, de compréhension et de preuve analogue à celui du scientifique. Par ailleurs la science progresse conjointement avec le développement des techniques, qui lui sont indispensables et auxquelles elle contribue.¹³ L'opposition science – ingénierie ne se base plus

12. Bachelard nous explique que "*l'enseignement des résultats de la science n'est jamais un enseignement scientifique*" [6].

13. Selon Bergson, il n'y a *pas d'homo sapiens sans homo faber*.

sur une distinction fondamentale au niveau des principes et des méthodes, et de moins en moins au niveau des objectifs d'action. Quelques spécificités en termes de formation sont discutées en Section 4.3.6.

Dans ce qui suit, nous présentons successivement les trois dimensions *matières, méthodes et principes* et discutons de leur nécessaire conjugaison lors de l'élaboration des curricula. Par ailleurs, à ces trois dimensions se rajoute la dimension temporelle qui conduit au déploiement progressif de la formation selon les phases de développement de l'enfant, pré-scolaire et scolaire, de l'adolescent, puis du jeune. Ce point nécessite un travail de détail dépassant le cadre de ce rapport. Nous l'illustrerons par quelques exemples. La question pédagogique, plus spécifique à la vision que nous préconisons ici, est détaillée en section 5.

4.1 Principes

Commençons par les principes de la démarche scientifique, une dimension difficile à appréhender, souvent absente de l'enseignement, mais qu'il est essentiel de bien mettre en avant, en particulier dans la formation des formateurs. Cette dimension est difficile car elle conduit à prendre du recul et à porter un regard critique sur les ingrédients de la démarche scientifique et les fondements de leur utilisation en science.

La science est avant tout un questionnement exigeant sur le monde. Elle n'est pas une collection de certitudes intangibles. Les explications et les modèles d'aujourd'hui seront possiblement élargis et affinés demain à la lumière de nouveaux faits, de nouvelles connaissances. Cette dynamique des connaissances n'affaiblit pas la science et ses savoirs, au contraire, elle les renforce. Elle démontre l'inanité des superstitions et des croyances sans évidences valides, voire contredites par les faits connus.

Une longue discussion est nécessaire ici ; nous ne donnerons qu'un bref aperçu sur quelques notions essentielles.

Notion d'observation. L'observation est à la base des sciences empiriques, à savoir les sciences de la nature qui appréhendent le monde grâce aux données sensibles fournies par nos sens, directement ou indirectement via une instrumentation adéquate. L'observation scientifique est *objective* et *répétable* dans des conditions bien qualifiées. Elle permet de bâtir des *faits* que la science s'efforce d'expliquer. Il est rare que l'observation scientifique soit fortuite. Elle nécessite généralement l'élaboration d'expériences répétées qui sont des questions que le scientifique pose à la nature et dont il se met en capacité d'observer les réponses (cf. sous-section 4.2).

Notion d'hypothèse. Les faits observés deviennent scientifiques à la lumière d'une analyse qui s'efforce de les expliquer et d'en déterminer les

causes. Cette analyse s'efforce d'éviter les convictions subjectives, les évidences ou les *vérités premières*¹⁴. Elle se base sur des hypothèses explicites et précises. Seules les hypothèses *falsifiables* sont scientifiques [49] : il s'agit d'hypothèses dont on peut concevoir les expériences et observations qui pourraient éventuellement les infirmer. Les hypothèses sont à introduire en science selon un principe de *parcimonie* (ou principe du "rasoir d'Okham"). Il s'agit de préférer l'explication qui fait appel aux hypothèses les plus simples et en nombre limité.

Notion de modèle. L'explication scientifique de faits observés se traduit en une description précise, appelée *modèle*. Cette description est souvent, mais pas obligatoirement, quantitative. Elle consiste en un ensemble de définitions, d'hypothèses, de relations, de règles ou "*lois*" qui relient les entités modélisées. Le terme de loi en science est trompeur ; il n'invite pas à la remise en cause critique.¹⁵ La notion de modèle scientifique est plus juste ; elle souligne qu'il ne s'agit que d'une approximation de la réalité, au même titre qu'une carte est une approximation du terrain cartographié. On cherche à concevoir des modèles qui sont :

- *intelligibles*, que chacun peut comprendre,
- *explicatifs*, qui rendent bien compte des faits passés observés, et
- *prédictifs*, qui permettent de prédire des observations futures.

Tout comme une carte, un modèle peut être erroné s'il est contredit par l'observation, auquel cas il doit être corrigé, complété, ou rejeté. Mais, par définition, un modèle est toujours incomplet : le terrain est toujours plus riche que la meilleure carte. Cependant, le terrain lui-même ne peut pas remplacer la carte pour comprendre, expliquer et prédire : on a constamment besoin d'un modèle.¹⁶ Enfin, un modèle portant sur un champ large ou fondamental est parfois qualifié de "*théorie*". Mais ce terme, à connotation idéologique, est moins précis et moins neutre que celui de modèle scientifique.

Notion de justification. Toute connaissance doit être justifiée. Sur un plan pédagogique, *la justification est plus importante que la connaissance* elle-même. La justification détaille les conditions d'objectivité et de rigueur d'une observation, les axiomes et étapes précises d'une preuve formelle pour une déduction. Elle valide un modèle par la vérification de sa cohérence interne et son adéquation aux faits connus, et par la confirmation de ses prédictions par l'expérience. Dans les sciences formelles (mathématiques, logique) la jus-

14. Pour Bachelard, en science "*Il ne saurait y avoir de vérité première. Il n'y a que des erreurs premières.*" [7]

15. Par confusion avec la loi juridique, qui est une convention sociale, relative dans le temps et l'espace, normative et requiert obéissance. Ces caractéristiques sont totalement orthogonales à la modélisation de phénomènes naturels.

16. Un navigateur qui se déplace sans carte a une carte en tête.

tification est une preuve. Dans les sciences empiriques, la justification utilise tous les éléments précédents, y compris des preuves.¹⁷

Principe de causalité. La science explique le pourquoi d'un fait observé en lui associant une ou plusieurs causes qui le précèdent dans le temps. Les causes sont elles mêmes expliquées causalement. La cause est un élément parmi un ensemble de conditions suffisantes pour produire un effet. Un lien causal est associé à une action matérielle, un champ de force, une transmission d'information. Il est possible d'inférer l'existence d'un lien causal même quand ce lien n'est pas directement observable. Par ailleurs, la causalité ne peut être exceptionnelle (à la tête du client) : les mêmes causes donnent toujours les mêmes effets. Ceci permet d'expérimenter et de traduire les explications en modèles précis. A noter que la régularité causale ne signifie pas que le futur est entièrement déterminé par le passé (notion réductrice de *déterminisme*). Enfin, il est important de bien expliquer qu'une *corrélation statistique n'a rien à voir avec une relation causale*.¹⁸

Principe de conservation. L'explication scientifique du monde nous démontre que tout change et évolue, même ce qui nous semble le plus immuable¹⁹. La modélisation de processus dynamiques met en avant des invariants, par exemple la vitesse de la lumière. Elle admet la conservation dans le temps de certaines propriétés, par exemple : la quantité de mouvement, d'énergie ou de masse d'un système (cf. Figure 5). Ces invariants, nécessaires aux modèles scientifiques, démontrent que des hypothèses de croissance indéfinie sont simplement absurdes. Par exemple, la croissance démographique d'une espèce de prédateurs épuise ses proies ; l'espèce ne peut survivre que dans un équilibre écologique avec son milieu.

Principe de rationalité. Une conclusion rationnelle découle d'une démonstration dont chaque étape applique aux axiomes et hypothèses que l'on se donne et aux résultats des étapes précédentes, un mécanisme logique bien fondé (par exemple le *modus ponens*²⁰) pour déduire le résultat suivant. Une décision rationnelle résulte d'un processus d'optimisation qui produit une solution dont on peut prouver qu'elle est la meilleure au sens d'un critère

17. Il n'existe pas de preuve formelle que demain matin le soleil se lèvera à l'est, mais le modèle qui prédit cet événement avec grande précision est amplement validé par l'observation.

18. Plus on se dépêche, plus on arrive en retard à destination. Cette corrélation fréquente occulte un troisième paramètre : un départ en retard qui cause les deux autres faits.

19. Ainsi, le jour solaire ne fait pas toujours 24h. La vitesse de la terre dans sa trajectoire elliptique autour du soleil varie : la durée du jour fluctue au cours de l'année de près de 50s. De plus, la rotation terrestre est ralentie par la lune : le jour moyen ne durait que 20h au Cambrien (il y a 5×10^8 ans) ; l'an prochain il aura 20μs de plus.

20. Si *a* entraîne *b* et si *a* est vrai, alors *b* est vrai, e.g., si tout homme est mortel et si Socrate est un homme alors Socrate est mortel.



FIGURE 5 – *Illustration du principe de conservation de l'énergie : ce cycliste (qui aurait découvert la théorie de la relativité en faisant du vélo) met en œuvre plusieurs formes d'énergie. Quelles sont-elles ? Que se passe-t-il quand Einstein freine ? Quand il allume ou éteint sa lumière, sa dynamo restant branchée ? Que devient sa vitesse dans un monde plat sans frottement ni résistance de l'air s'il continue de pédaler ? Expérimenter !*

que l'on se donne a priori. Cependant, il est essentiel de souligner que ces hypothèses ou que ces critères sont *externes* au principe de rationalité. Ils correspondent à des choix a priori, parfaitement révisables. D'autres décisions seraient tout aussi rationnelles relativement à d'autres critères. Il en va de même pour les hypothèses d'une conclusion rationnelle. Donc, n'admettre une conclusion ou une décision rationnelle qu'après explicitation, examen critique et éventuelle remise en cause de leurs hypothèse ou critères.

Principe d'éthique. Depuis la renaissance, la science est devenue inséparable de la technique. On parle d'ailleurs de *techno-science*, parfois avec une connotation péjorative associée à l'avidité de la course au profit et au maintien de rapports de force sociaux et internationaux préjudiciables à l'humain. On sait que "*Science sans conscience n'est que ruine de l'âme*" [51]. On sait également que si connaissance et croyance sont deux notions distinctes, la connaissance n'est pas non plus la sagesse. Former par la démarche scientifique nécessite également d'enseigner la sagesse de l'usage des connaissances. Le programme de Descartes, qui est de "parvenir à des connaissances (pour) nous rendre comme *maîtres et possesseurs de la nature*" [19], continue d'être le principal ressort de développement des STEM dans de nombreux pays. L'interprétation de ce programme alimente encore une vision de domination dont on voit, avec inquiétude croissante, les ravages sur notre planète. Il faut expliquer l'adage de Bacon que "on ne commande à la nature qu'en lui *obéissant*" [8]. La connaissance scientifique ne doit pas nous mettre dans une illusion de possession de la nature, mais dans une position de maîtrise de nous-mêmes, en tant que composante consciente et émerveillée de cette nature, que nous nous efforçons de comprendre et dont nous faisons partie.

Le lecteur sceptique pourrait s'interroger sur la capacité d'enfants et d'adolescents à appréhender les notions qui précèdent. Sont-elles enseignables en dehors d'un cours spécialisé de philosophie des sciences ? Trois arguments militent en faveur d'une réponse positive :

- Tout d'abord, on sait depuis Piaget [47] que l'enfant découvre très tôt les relations causales par l'expérience et la manipulation d'objets ; il élabore des modèles et se construit progressivement une représentation du monde où la causalité est bien présente.
- Par ailleurs, il ne s'agit pas d'enseigner ces principes en tant que matière dès le primaire. Il s'agit, à l'occasion d'un cours sur une notion classique (e.g., le choc de deux ballons, la chute d'une pierre), d'introduire les termes d'observation, d'hypothèse, de justification, de conservation, de modèle. Il s'agit de construire le cours de manière vivante de telle sorte que l'enfant puisse de lui même identifier ces notions dans sa démarche et ses expériences, corriger des intuitions fausses (un ballon lourd tombe-t-il plus vite

qu'un ballon léger?) et comprendre comment interroger la nature pour parfaire ses représentations. L'expertise pédagogique de l'enseignant est critique sur ce point ; il faut lui apporter cette expertise.

- Enfin, former des praticiens, des scientifiques, et des enseignants des sciences sans leur apporter une formation en épistémologie, et en éthique des sciences et de leurs professions, comme c'est souvent le cas aujourd'hui, est une ineptie aux effets sociaux néfastes. Il est urgent d'y mettre fin. Nous recommandons de sensibiliser l'élève aux principes de la science le plus tôt possible, d'introduire ces notions dans tous les cursus universitaires et d'y former les formateurs.

4.2 Méthodes

L'importance de l'enseignement des méthodes et pratiques scientifiques est largement reconnue. Bien comprendre ces pratiques, s'y exercer et les cultiver régulièrement, est éminemment formateur. L'enseignement des méthodes scientifiques est de plus en plus intégré avec succès dans les curricula de formation. Généralement, cet enseignement distingue trois types d'activités (cf. Figure 6) :

- *Investigation* : explorer le monde réel par un questionnement ouvert mais précis et rigoureux.
- *Conception* : imaginer des explications aux faits observés, des modèles, des expériences, des preuves et des approches de résolution des problèmes posés.
- *Evaluation* : soumettre à l'analyse critique chacune des étapes d'investigation comme celles de conception et d'élaboration des solutions : confronter les modèles aux réalités, tester les solutions et les systèmes conçus, exhiber les hypothèses et les soumettre au doute.

Ces activités sont répétées itérativement, l'évaluation conduit à plus d'investigation, ce qui permet d'approfondir et d'améliorer progressivement les solutions trouvées. Dans la conception, comme dans l'investigation et l'évaluation, ces activités sont éminemment inventives et font appel à l'imagination et à la créativité de l'enfant.

Le schéma précédent ne se réduit pas à une seule méthode rigide. Il se décline en une diversité riche de méthodes, en particulier selon les possibilités d'expérimentation et d'observation. Par exemple, les simulations et les tests enrichissent les possibilités de conception, d'investigation et d'évaluation dans de nombreux domaines, dont celui des sciences de l'ingénieur. Toutes ces méthodes insistent sur un point important : la rigueur de la démarche. Il s'agit d'être très attentif aux sources multiples d'erreur. L'approximation est nécessaire, mais elle ne peut être implicite, cachée sous le tapis, ou inconsciente. Il faut l'exhiber au clair, ainsi que toutes les hypothèses qui supportent le modèle. Il faut qualifier les observations, analyser les sources

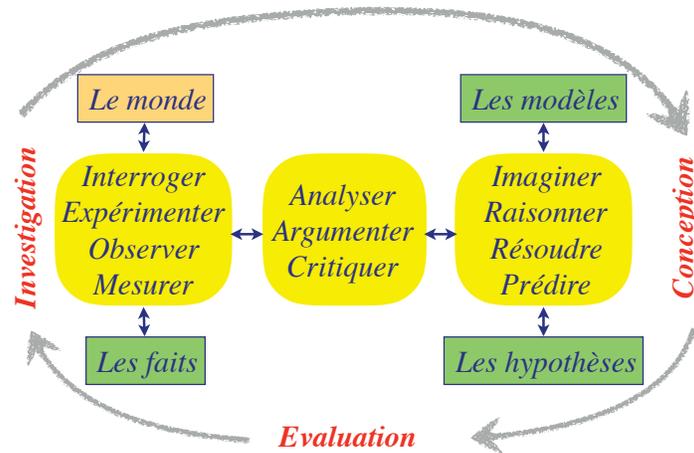


FIGURE 6 – Boucle “Investigation – Conception – Evaluation”, au cœur de la démarche de la science et de l’ingénierie.

d’incertitude de chaque type de données, identifier le fortuit du nécessaire et se rappeler que la corrélation n’est pas une relation causale.

De nombreux documents couvrent de façon détaillée l’enseignement conjoint des méthodes et matières scientifiques. L’approche de Quinn et al. [50] est particulièrement intéressante en ce sens qu’elle illustre les ingrédients des principales méthodes en termes de compétences précises à acquérir aux diverses phases de la scolarité. Elle distingue les huit compétences suivantes :

- Formuler correctement des questions et poser des problèmes scientifiques ou techniques.
- Développer et utiliser des modèles.
- Planifier et mener des investigations.
- Analyser et interpréter des données.
- Utiliser les mathématiques et les approches numériques.
- Construire des explications et concevoir des solutions.
- Formuler des argumentaires bien fondés.
- Obtenir, évaluer et communiquer des informations.

La plupart des compétences qui précèdent peuvent être introduites très tôt dans la scolarité, en particulier par l’emploi de descriptions et de modèles *qualitatifs*. Certes, la science s’efforce d’apporter des réponses précises et donc souvent quantitatives, à des questions focalisées. Cependant, ceci ne réduit pas l’importance des modèles qualitatifs²¹. Il s’agit donc de décliner

21. Rappelons que le modèle de l’évolution biologique, certainement un des plus marquant et fertile dans l’histoire des sciences, fut publié par Darwin sans une seule équation.

la progression sur les points qui précèdent tout au long de la scolarité, en parallèle avec la maturation de l'enfant et sa maîtrise de la langue, des concepts abstraits et des mathématiques.

Chacun des items précédents doit être détaillé en compétences précises. Ainsi, le premier item est développé par Quinn et al. [50] selon les compétences suivantes :

- Formuler des questions sur la nature et les artefacts humains. Par exemple : pourquoi y a-t-il des saisons ? pourquoi une loupe au soleil permet d'enflammer une feuille ? comment faire un four solaire ? que font les abeilles ? pourquoi la lune tourne autour de la terre en nous montrant toujours la même face ?
- Distinguer une question scientifique d'une question non scientifique.
- Formuler et affiner des questions auxquelles on peut répondre expérimentalement en classe, concevoir une investigation et construire des réponses.
- Décomposer un argumentaire en questions associées à chaque étape qui permettent d'approfondir et d'affiner une solution, d'évaluer et de critiquer une explication. Par exemple : d'où vient ce fait ? quelles preuves appuient cet argument ?
- Relever les caractéristiques, les propriétés, les biais éventuels, les sources d'erreur et possibles contradictions des données observées ; formuler les questions qui en découlent.
- S'interroger sur les spécifications d'un projet technique et les contraintes qui limiteront la conception.

Une progression dans l'acquisition de ces compétences y est également discutée. Par exemple, la formulation d'argumentaires bien fondés doit s'appuyer très tôt sur une initiation à la communication orale et à la prise de parole.

En conclusion, la prise en compte de la dimension "*Méthodes*" dans l'élaboration de curricula peut se faire à partir des éléments résumés en [Figure 6](#) et en comparaison de plusieurs approches connues sur le sujet. Nous recommandons en particulier l'approche citée [50], qui est prolongée par des recommandations précises [40] et par un guide de mise en œuvre [43]. Bien entendu, il ne s'agit pas de prendre ces documents à la lettre (par exemple au niveau de la séparation qui y est faite entre science et ingénierie, qui nous semble discutable sur plusieurs points).

4.3 Matières

Comme souligné précédemment, les matières scientifiques gagnent à être abordées en tant que vecteur de formation, permettant de pratiquer les méthodes et de comprendre les principes scientifiques. La métaphore du sport est expressive : l'exercice de la course à pied ne vise pas à parvenir à une destination mais à former un corps sain. De plus, on ne forme pas au sport

principalement pour produire des champions olympiques. Mais, la pratique sportive, nécessaire au développement de tous les enfants, révélera des talents et vocations de futurs champions. Il en va de même pour l'enseignement des matières scientifiques. Les objectifs d'acquisition des connaissances de base par de futurs scientifiques seront plus efficacement remplis comme effets de la formation par la démarche scientifique pour tous (cf. la discussion en [sous-section 2.2](#)).

Le choix des matières à enseigner est guidé par cette motivation première. Il est également guidé par les possibilités de l'enseignant d'illustrer concrètement les matières scientifiques et techniques sur des questions qui passionnent les élèves, qui les incitent à s'engager activement, dans et surtout *hors* de l'école, à pratiquer l'observation, l'expérimentation et la réflexion. Il est important de laisser une grande flexibilité à l'enseignant et à la classe, de choisir les sujets à traiter et à approfondir dans des projets et travaux personnels.

Nous recommandons pour la définition des curricula d'insister sur les méthodes et les principes, de ne donner les matières qu'à titre indicatif, en laissant une marge de choix à l'établissement, aux enseignants, voire aux élèves. La continuité entre une année et la suivante dans le cursus de formation ne se fait pas sur des contenus et des connaissances précises, mais sur des méthodes et des savoir-faire bien acquis.

Il est également important de souligner un nécessaire *allégement quantitatif* des curricula relativement à ceux en vigueur aujourd'hui. En effet, pour faire place aux priorités sur les méthodes et principes, un allégement important sur les matières est nécessaire. Les priorités que nous soulignons, ainsi que la nécessité d'illustrer la diversité des méthodes scientifiques, seront donc les principaux guides pour un choix raisonné des matières illustratives.

En conséquence de cette discussion, on ne détaille pas dans ce qui suit des recommandations précises sur une liste de matières à couvrir. On propose pour chaque grand champ scientifique et à titre principalement indicatif, un petit nombre de *concepts* qui nous semblent fructueux comme vecteurs de formation. Ces concepts peuvent servir de fil conducteur à l'élaboration des curricula aux divers niveaux de formation, du pré-scolaire au baccalauréat. Une excellente illustration de la déclinaison de ces concepts en contenus éducatifs est fournie dans [40, 43, 50], documents à partir desquels nous avons synthétisé une partie de ces notions. Soulignons quelques points importants :

- Il est formateur de reprendre le même concept à divers niveaux scolaires avec une progression sur les détails et la précision des modèles couverts ;
- Il est important de présenter tous les concepts qui suivent, en particulier en mathématiques, de façon très concrète et d'éviter les abstractions excessives et prématurées ;
- Il n'est pas nécessaire de commencer par des modèles quantitatifs, ni d'attendre d'avoir les bases mathématiques nécessaires à ces modèles.



FIGURE 7 – Ordres de grandeur : un kilomètre représente 10 à 15 minutes de marche ; un millimètre l'épaisseur d'une dizaine de feuilles. Imaginer parcourir un kilomètre millimètre par millimètre : un million de petits pas (en faire quelques uns). Un transistor ou un virus font quelques nanomètres ; il y a autant de millimètres dans un kilomètre que de nanomètres dans un millimètre. Imaginer la même expérience de parcours de un millimètre en un million de pas, de un nanomètre chacun. Faisons maintenant un million de pas de un kilomètre chacun en ligne droite : ils nous amèneraient trois fois plus loin que la lune. Il faudrait refaire cette expérience 150 fois pour arriver au soleil. Des notions du même type peuvent permettre d'introduire les échelles de temps, de la nanoseconde au milliard d'années.

Ainsi, on peut introduire les ondes en expérimentant sur un plan d'eau et la dynamique en jouant aux balles, sans attendre l'acquisition des fonctions trigonométriques ou du calcul différentiel. On peut également expliquer les ordres de grandeur en restant très concret (voir [Figure 7](#)).

Le découpage qui suit en sous-sections par champs disciplinaires n'est justifié que par un besoin de présentation synthétique de cette section. Il ne doit pas inciter à cloisonner l'enseignement. Un effort constant de recherche de *liens interdisciplinaires* doit guider l'élaboration des curricula. Ces liens sont en particulier essentiels entre les champs formels (les mathématiques et en partie les sciences numériques) et les champs empiriques (les sciences de la nature et l'ingénierie).

4.3.1 Sciences de la terre et de l'univers



FIGURE 8 – Illustration de la rotation de la terre (photo nocturne avec toute caméra à pose longue) : Que représentent ces arcs de cercles concentriques ? Quel est leur centre ? Comparer leurs longueurs ? Qu'en est-il de leurs angles sous-tendus ? Peut-on estimer la durée d'exposition de cette photo ? Qu'en est-il du segment transverse proche du centre ? Expérimenter !

L'astronomie est souvent mentionnée comme étant la plus vieille science de l'humanité.²² L'observation du ciel est une féerie merveilleuse, qui nous interpelle constamment et qu'il est si naturel d'associer à une excellente pratique de la méthode scientifique. Malheureusement la majorité des diplômés en science, sans parler de ceux qui ne le sont pas, n'ont pas connu le bonheur d'une telle pratique. Il n'est pas nécessaire de connaître le calcul différentiel et les méthodes numériques de la mécanique céleste pour l'aborder. Il n'est pas nécessaire non plus d'avoir un télescope à sa disposition. Ces ingrédients

22. "Sans l'astronomie, l'homme ignore la place qu'il occupe", nous dit Aristote.

n'étaient pas accessibles à Al Khawarizmi, à Ticho Brahé et à beaucoup d'autres qui ont fait avancer le savoir humain. Il est important d'introduire des notions de bases d'astronomie dès l'école primaire,²³ et de pouvoir les approfondir dans le secondaire. Il est essentiel de les assoir sur l'observation du ciel (magnifiquement étoilé dans les campagnes marocaines), par exemple associée à l'élaboration d'une carte, au suivi des mouvements apparents des étoiles (cf. Figure 8), ou simplement à l'observation de la lune (cf. Figure 9).



FIGURE 9 – *Cette lune est-elle dans son premier ou dernier quartier ? Quatre heure après l'avoir observée, notre terre sera à la position qu'occupe cette lune dans l'espace, pourquoi ? Qu'en est-il lorsque la lune est à son premier quartier ? Comparer plusieurs photos de la pleine lune, que remarque-t-on ? Pourquoi ? Expérimenter !*

Par ailleurs, les conditions de vie sur notre planète sont fragiles. La civilisation sur terre est désormais menacée par les activités humaines. Cette menace réelle ne peut être évitée que si elle est pleinement appréhendée par chacun. Il est essentiel de former les prochaines générations à comprendre et respecter leur planète.

Les notions suivantes, combinées selon des progressions adéquates à celles des autres champs scientifiques et exploitées pour former à la démarche scientifique, peuvent servir de trame à l'élaboration de curricula prenant en compte les sciences de la terre et de l'univers :

- *La terre dans l'univers*
 - Vie des étoiles
 - Galaxies, univers et frontières de nos connaissances
 - Le système solaire
 - Histoire de notre planète
- *Géosciences*
 - Matériaux et systèmes terrestres

23. Une ronde d'enfants dans la cour d'école peut illustrer le mouvement de la terre et de la lune, voire des planètes, relativement au soleil.

- Tectonique des plaques et interactions à grande échelle
- Cycle de l'eau
- Erosion, pédologie, dynamique des sols
- Climat et températures
- Biogéologie
- *Terre et activité humaine*
 - Ressources naturelles et développement durable
 - Risques naturels
 - Impacts humains sur les systèmes terrestres
 - Changements climatiques mondiaux

Cette liste, partielle et non ordonnée, est à prendre principalement à titre indicatif.

4.3.2 Sciences de la vie

Ce champ essentiel fait l'objet d'un développement spécifique en Annexe A, à laquelle nous renvoyons. Nous recommandons d'aborder les sciences de la vie très tôt, dès le pré-scolaire, par exemple par l'observation et l'expérimentation végétale, ou par les liens entre biologie et santé (cf. Figure 10). La dimension multi-disciplinaire y est particulièrement importante. Il est nécessaire d'orienter la formation en science de la vie vers une "approche système" et une vision de *biologie intégrative*²⁴.

Les notions suivantes nous semblent fructueuses comme vecteur de formation à la démarche scientifique, à prendre en compte pour l'élaboration de curricula dans les sciences de la vie :

- *Des molécules aux cellules et organismes*
 - Structure et fonction
 - Croissance et développement des organismes
 - Organisation métabolique des organismes, matière et flux d'énergie
 - Vie et information
- *Biotopes*
 - Caractéristiques des biotopes
 - Ecosystèmes, interdépendances et relations trophiques
 - Dynamiques des biotopes, cycles de matière et d'énergie
 - Fonctionnement et résilience des biotopes
 - Interactions sociales et comportement de groupe
- *Reproduction biologique*
 - Processus de la mitose et de la méiose
 - Héritage et combinaison des allèles, variation et stabilité
 - Stratégies démographiques des espèces

24. celle-ci porte sur une modélisation intégrée, structurale et fonctionnelle, des multiples phénomènes intervenant aux divers niveaux des organisations hiérarchiques du vivant.



FIGURE 10 – Illustrations de quelques paramètres physiologiques simples : faire mesurer aux enfants leur rythme respiratoire et leur rythme cardiaque avant et après l'exercice. Que constate-t-on ? Pourquoi ? Qu'en est-il de leur transpiration ? Pourquoi ? Comment évolue la température de leur corps ? Pourquoi ? Que se passe-t-il quand le même exercice est fait au soleil ? Pourquoi ? Expérimenter !

- *Évolution biologique*
 - Relation d'ascendance et diversité
 - Mécanismes de mutation et de sélection naturelle
 - Génétique et évolution
 - Dynamique d'adaptation à l'environnement
 - Biodiversité et humains
- *Biologie et santé*

Encore une fois il ne s'agit que d'une liste indicative. Nous renvoyons à l'annexe A pour un argumentaire détaillé.

4.3.3 Sciences de la matière

Les sciences de la matière sont traditionnellement bien couvertes, en particulier au secondaire. C'est vraisemblablement un des domaines (avec les mathématiques) où les recommandations d'allègement quantitatif, de moins d'abstraction et d'un plus fort accent sur les méthodes, les pratiques et les principes sont particulièrement pertinentes²⁵.

Les notions suivantes nous semblent riches de questionnements formateurs. Elles pourraient être prises en compte pour l'élaboration de curricula

25. Selon [29], les enquêtes indiquent que la physique est la matière la moins aimée des lycéens. Ce livre cite un académicien français qui avoue : "je n'aimais pas la physique, je ne voyais pas où ça allait (...), ce mélange compliqué de théorèmes, d'expériences, de principes et de choses disparates, (...); le tout c'était d'arriver à trouver ce qu'il fallait savoir le jour de l'examen".

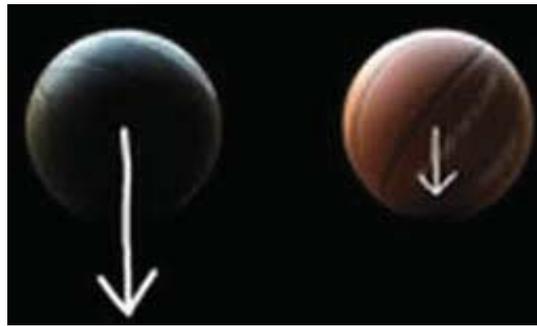


FIGURE 11 – Illustration de notions simples de dynamique : la balle noire est trois fois plus lourde que la rouge ; les deux sont lâchées au même instant. Laquelle arrivera en premier ? Comment évoluent leurs vitesses respectives pendant leur chute ? Qu'en est-il des forces qu'elles subissent ? Faire des observations et mesures avec deux balles de tennis usagées ; à l'aide d'une seringue en remplir une d'eau. De combien sera-t-elle plus lourde ? Expérimenter !

sur les sciences de la matière :

- *Matière et interactions*
 - Structure et propriétés de la matière
 - Réactions chimiques
 - Les particules et leurs interactions
- *Dynamique*
 - Forces et mouvements
 - Types d'interactions
 - Stabilité et instabilité des systèmes physiques
- *Energie*
 - Formes de l'énergie
 - Conservation et transfert de l'énergie
 - Relation entre énergie et forces
 - L'énergie dans les processus chimiques et la vie quotidienne
- *Ondes et rayonnements*
 - Propriétés des ondes
 - Rayonnement électromagnétique
 - Optique

Il est important d'aborder très tôt dans la scolarité une partie de ces notions de façon *qualitative* (cf. Figure 11 et Figure 12). L'introduction de modèles mathématiques quantitatifs peut venir dans un second temps. Il est également important et souvent très naturel de situer ces notions dans un contexte interdisciplinaire, par exemple en lien avec les deux sections qui précèdent et avec les sciences numériques et l'ingénierie.

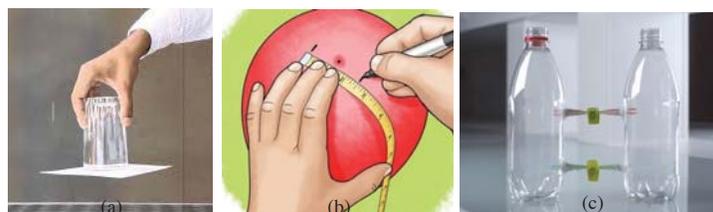


FIGURE 12 – Illustrations de propriétés des fluides : (a) L'eau qui remplit entièrement le verre ne se renverse pas, pourquoi ? Est-ce la feuille de papier qui la retient ? Que se passe-t-il si on enlève la feuille ? Quel est son rôle ? (b) Mesurer et marquer une longueur sur le ballon gonflable ; le mettre dans un endroit froid (un frigo par exemple). Que devient cette longueur ? Le mettre au soleil, mesurer de nouveau. Que se passe-t-il ? Le lâcher, (si assez chaud) il s'élève dans le ciel, pourquoi ? Le ballon se dilate durant son ascension et (si bien gonflé au départ) il éclate, pourquoi ? (c) Ces deux bouteilles sont reliées par des pailles ; les remplir d'eau colorée, rouge à droite et verte à gauche. Enlever les pinces des pailles. Que se passe-t-il ? Recommencer après avoir chauffé l'eau verte uniquement. Que se passe-t-il maintenant ? Pourquoi ? Des expériences similaires, faciles à réaliser, permettent d'expliquer par exemple des propriétés de conductivité thermique, de réflexivité, d'effet de serre, etc. Expérimenter !

4.3.4 Mathématiques

L'enseignement des mathématiques bénéficie d'une longue tradition dans l'école marocaine et d'une image d'excellence élitiste en termes de réussite d'une faible minorité de quelques très bons élèves (cf. l'argumentaire en section 2.2). Rappelons que cet enseignement ne vise pas, en premier, à former des mathématiciens, mais des personnes capables de raisonner sainement. Que sont une induction, une déduction, une abduction, une preuve récursive correctes ? Comment formuler mathématiquement un problème concret, lequel en pratique ne se rencontre pas sous forme d'équations ou de fonctions bien posées, sur lesquelles il suffit de dérouler des techniques rodées²⁶. Comment analyser, qualitativement et quantitativement, le problème ; quels paramètres interviennent dans sa modélisation ; quels sont les observables et quelles approximations sont possibles ?

Une part importante de l'enseignement des mathématiques doit être réservée à la maîtrise de ces concepts, bien davantage qu'à la maîtrise de techniques formelles, moins formatrices et souvent de faible utilité pour une carrière future²⁷. L'analyse mathématique, qui occupe pour des raisons historiques

26. Il est formateur d'aborder des notions mathématiques à partir de problèmes formulés uniquement en langage naturel et à l'aide de graphiques. Dans ce sens les jeux et puzzles mathématiques apportent une mine très riche d'exemples, e.g., [26].

27. Beaucoup de jeunes, qui ne maîtrisent pas la règle de trois, passent un temps considérable à apprendre la résolution des équations du second degré sans avoir une idée précise de leur utilité pratique, ni de comment on peut passer aux degrés supérieurs à deux.

une part importante au secondaire, contribue relativement moins que, par exemple, la géométrie ou la logique, aux capacités de raisonnement qui précèdent. Par ailleurs, l'utilité des techniques d'analyse pour le futur ingénieur est à revoir avec l'usage des calculettes graphiques. Dans ce sens, l'évaluation des compétences enseignées doit pouvoir se faire à *livres et ordinateurs ouverts*.

Nous recommandons une révision substantielle des curricula en mathématiques sur la base de la vision défendue ici. Il s'agit de former au raisonnement rigoureux et à la modélisation mathématique du concret, de laisser place au qualitatif et aux mathématiques discrètes (développées plus longuement en section suivante), en commençant très tôt par des concepts intuitifs simples (cf. Figure 13). L'enseignement primaire en particulier doit privilégier des mathématiques concrètes sur la base de graphiques très visuels et de problèmes ludiques [13]. Un *allègement* important du programme sur d'autres parties est nécessaire. Encore une fois, la démarche schématisée en Figure 4 aborde les matières comme prétexte pour acquérir les méthodes et les principes.

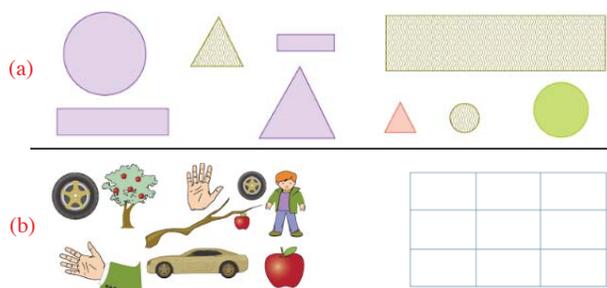


FIGURE 13 – Illustration simple d'ensembles et de classes : (a) Les 9 objets dans cette figure peuvent donner lieux à combien de sous-ensembles (en donner quelques uns)? Quels classements de ces objets sont possibles? Quels sont les 10 sous-ensembles qui résultent de ces classements? (b) Comment classer les objets de cette figure selon les 9 cases du tableau 3×3 ?

On liste ci-dessous quelques notions potentiellement fructueuses pour apprendre à raisonner sainement, à prendre en compte pour l'élaboration des curricula en mathématiques.

- *Ensembles*
 - Opérations d'union, d'intersection, de complément, d'inclusion
 - Relations, classes, catégories
 - Produits cartésiens, projections, jointures
- *Géométrie*
 - Lignes, angles, formes et constructions élémentaires
 - Géométrie Euclidienne dans le plan

- Calculs géométriques linéaires, angulaires, surfaciques, volumiques
- Géométrie tridimensionnelle, projection, perspective
- Congruences et transformations géométriques
- *Arithmétique et calcul*
 - Enumération, opérations sur les entiers, représentation en diverses bases
 - Nombres relatifs, nombres rationnels
 - Nombres irrationnels, notion d'approximation et calcul d'intervalle
 - Nombres complexes, vecteurs et matrices
- *Mesures*
 - Mesures angulaires, curvilignes, surfaciques
 - Dimensions et ordre de grandeur
 - Métriques, distances et normes
 - Précision et calcul d'erreur
- *Algèbre*
 - Expressions algébriques, opérations et leurs propriétés
 - Anneaux, groupes, corps
 - Equations et inéquations à une et plusieurs variables
 - Polynômes
- *Analyse*
 - Représentation, construction et propriétés de fonctions
 - Types de fonctions : rationnelles, trigonométriques, hyperboliques, etc.
 - Composition de fonction
 - Dérivation, intégration
- *Probabilités et statistique*
 - Distributions, histogrammes
 - Variables aléatoires
 - Probabilités conditionnelles, dépendances, corrélations
 - Réseaux Bayésiens
- *Modélisation mathématique*
 - Description géométrique de problèmes spaciaux et non spaciaux
 - Modélisation algébrique, proportions
 - Modélisation relationnelle et par contraintes
 - Incertitude dans les modèles
 - Modèles non déterministes, e.g., dans l'aide à la décision

Les liens entre ces notions et celles présentées dans les autres champs scientifiques sont essentiels. Ces liens sont en particulier à développer avec les sciences numériques.

4.3.5 Sciences numériques

Le terme “*numérique*” fait référence à l'ensemble des instruments, conceptuels et matériels, associés à l'information, à la communication, à la détection

et au traitement de signaux et de données de toutes sortes. Le numérique est un élément déterminant pour la formation en général et la formation par la science en particulier. Il doit être appréhendé aux trois niveaux suivants :

- *L'alphabétisation numérique* qui correspond à un ensemble de techniques et de savoir-faire pratiques dont la maîtrise est désormais essentielle pour pouvoir s'informer, s'exprimer et raisonner (cf. sous-section 4.4).
- *Les sciences numériques* qui recouvrent un large corpus de concepts, de méthodes et de compétences, à l'intersection des mathématiques et de l'ingénierie et qui sont au cœur de transformations d'ampleur dans tous les champs scientifiques et techniques.
- *La pédagogie numérique* qui développe un ensemble de méthodes pédagogiques pour démultiplier et prolonger l'école grâce aux possibilités d'adaptation et d'interaction du numérique.

Ces derniers points sont détaillés en Annexe C. Résumons dans ce qui suit les bases des sciences numériques, pas toujours bien comprises (parfois réduites par erreur à la programmation). Ces bases s'appuient sur l'intégration des éléments suivants :

- (i) des modèles mathématiques et des méthodes de calcul et de simulation ;
- (ii) des techniques d'instrumentation, de mesure et d'imagerie pour l'observation et la collecte de signaux ; et
- (iii) des méthodes de traitement de données, issues des mesures ou des calculs et des algorithmes de recherche et d'apprentissage qui permettent d'extraire des signaux observés des relations significatives et de nouvelles connaissances.

Les sciences numériques se concrétisent en des approches nouvelles de représentation des connaissances, de formulation et de résolution de problèmes. Elles permettent d'appréhender des concepts clés tels que la calculabilité, la complexité, l'observabilité, la stabilité, ou la contrôlabilité d'un système. Dans le domaine du numérique, comme dans tous les autres domaines, il faut partir de notions simples et très concrètes. Ainsi l'algorithmique peut être enseignée dès le primaire par des procédures ludiques (cf. Figure 14). Soulignons que l'enseignement des sciences numériques n'est pas un but en soi, mais un vecteur de formation qui se trouve être particulièrement bien adapté pour stimuler les *capacités créatives* de l'enfant [84]. Il faut privilégier, via cet enseignement par une pédagogie active, le développement des aptitudes d'observation, d'imagination et d'abstraction de l'apprenant, plutôt que ses capacités de simple consommation d'outils numériques.

Les notions suivantes sont fructueuses pour la formation à la démarche scientifique, à prendre en compte pour l'élaboration des curricula en sciences numériques :

- *Structure et organisation des données et des connaissances*
 - Les relations, leurs compositions et projections



FIGURE 14 – (a) Ces enfants exécutent un algorithme de tri des nombres qu'ils portent par une petite ronde amusante (visualiser la vidéo [69]). Qu'elle est l'opération de base de cet algorithme ? Cette opération conduit-elle nécessairement à une séquence ordonnée ? Pourquoi ? Comment détecter que la ronde doit s'arrêter si on n'a pas une vision globale de la séquence ? Combien d'opérations de permutation sont nécessaires pour ordonner une séquence de 9 nombres ? Combien en faut-il pour 100 nombres ? Peut-on faire cette ronde avec plusieurs permutations des enfants en parallèle ? Comment ? D'autres algorithmes de tri plus élaborés peuvent être mis en œuvre avec les mêmes techniques ludiques [70]. (b) Ces vingt enfants organisent un championnat de ping pong, chacun jouant un match contre chacun des autres ; ils n'ont que trois tables. Comment organiser leur championnat en permettant aux joueurs de se reposer entre les matchs ? Qu'en est-il s'ils sont 38 enfants avec 5 tables ? Quels algorithmes permettent d'organiser un championnat pour tout nombre d'enfants et de tables ? Quels sont leurs avantages et inconvénients respectifs ? Comment gérer également les matchs en double ? Expérimenter !

- Les graphes, arbres et forêts
- Les ontologies, les classes, les hiérarchies et les héritages d'attributs
- Les grammaires formelles, les automates et machines abstraites
- Les méthodes d'indexation, d'indirection, d'unification
- La récursivité des processus et des structures
- *Algorithmes*
 - Les procédures, les notions d'invariants et de terminaison
 - La concurrence, le parallélisme et la distribution des procédures
 - L'abstraction, la décomposition et la hiérarchisation de problèmes
 - Les espaces de recherche et les stratégies d'exploration
- *Signaux*
 - Les canaux de transmission, le bruit et l'entropie
 - Le codage, la compression, l'encryption de données
 - L'estimation et le filtrage
 - La contre-réaction, la régulation, l'asservissement et la commande.
- *Raisonnements et logique*
 - Le raisonnement par récurrence
 - Les figures classiques du raisonnement déductif, abductif et inductif
 - Les notions d'interprétation de formules logiques, de preuve et de conséquence logique, les logiques saines, complètes et décidables

- *Fonctionnalités numériques*

- Le design graphique, la synthèse d'images, la conception et la réalisation numérique (imprimantes 3D)
- La simulation et la visualisation de systèmes dynamiques
- La catégorisation et la reconnaissance des formes
- L'apprentissage statistique et logique, supervisé ou par renforcement
- La planification et l'ordonnement
- Traitement du langage naturel : analyse, transcription, synthèse, résumé, traduction automatiques de documents

Ces notions, données à titre indicatif, sont développées en Annexe C, à laquelle nous renvoyons.

4.3.6 Ingénierie

Les motivations de l'ingénieur pour concevoir un artefact et celles du scientifique pour comprendre un phénomène sont certes distinctes, mais aujourd'hui il n'y a plus de séparation fondamentale ou méthodologique entre les sciences de la nature et celles de l'ingénieur. Leurs démarches sont similaires. Le schéma en [Figure 6](#) qui illustre la boucle *investigation – conception – évaluation* s'applique aux deux, avec des spécificités pour l'ingénierie, en particulier en termes de formation par l'ingénierie, que nous évoquons ici.

Les *activités manuelles* jouent un rôle déterminant pour la formation, dès le plus jeune âge. Ceci est particulièrement le cas pour les activités manuelles techniques, qui associent à l'habileté, la dextérité et la précision des mouvements, des qualités d'observation, d'interprétation, de réflexion et de décision, par exemple pour le choix d'outils, de façons de faire et d'organisations de la tâche. Nous recommandons d'introduire ces activités manuelles dès le pré-scolaire, en support d'une pédagogie active sur des projets motivants (cf. ??). Les possibilités multiples sont à exploiter en fonction du contexte local. Ainsi, en milieu rural il est important de privilégier des projets de nature agronomique, par exemple sur l'irrigation, l'arboriculture (tutorage, greffage, semis, clonage, serres, etc.), la mesure et l'instrumentation agricole, voire les énergies d'appoints (pompe photovoltaïque, four solaire, etc., cf. [Figure 15](#)). En tous milieux, la formation par des activités culinaires (faire le pain, le fromage, travailler et préparer une diversité de légumes) est très instructive sur de nombreux plans, y compris au niveau de la sociabilité de l'enfant dans le partage. Enfin, au niveau des collèges et lycées, il serait judicieux de mettre en place des "*FabLabs*", lieux à accès libre où les élèves peuvent créer librement, réaliser et tester des prototypes et démonstrateurs pour leurs projets.

Par ailleurs, le processus de conception technique nécessite une formation explicite au niveau de ses méthodes. Ainsi, la phase d'investigation s'accompagne d'un effort de *spécification des besoins et des contraintes*. La phase de conception s'affine en étapes progressives, du *maquetage* à l'optimisation.

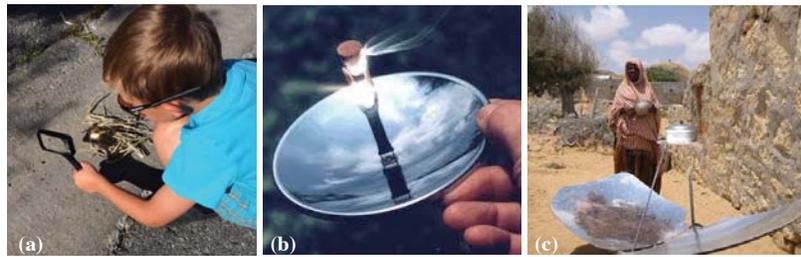


FIGURE 15 – Illustrations simples d'effets thermosolaires : (a) Avec une loupe cet enfant parvient à allumer un feu, comment et pourquoi ? Quelle orientation de la loupe est nécessaire ? Que se passe-t-il si la loupe est trop prêt ou trop loin de la cible, ou partiellement dans l'ombre ? (b) Même question pour cette parabole ; comment déterminer son foyer ? Que se passe-t-il si on la laisse immobile un long moment ? (c) Peut-on s'inspirer de ce qui précède pour faire un four solaire de plus grande dimension (four à pain, four à céramique) ? Plutôt qu'une seule parabole, peut-on en utiliser plusieurs petites ? Comment leur faire suivre la course du soleil manuellement ? Automatiquement ? Expérimenter !

La phase d'évaluation accompagne la conception et l'investigation ; elle fait intervenir un processus de *recette*.

Enfin, tous les principes discutés en [sous-section 4.1](#) sont pertinents pour l'ingénierie. Cependant, le *principe d'éthique* y est particulièrement important du fait de l'objectif d'action sur le monde et de sa transformation en réponse à de besoins humains. L'élève devra très tôt être sensibilisé à une appréciation critique des finalités d'un projet technique et des modalités possibles de sa mise en œuvre. Il doit apprendre à poser et analyser des questions éthiques, par exemple, quels aléas et risques sont abordés dans un projet ? Quels impacts en aval d'un réseau d'interdépendances ? Quelles retombées sociales ou environnementales ? Quels effets à long terme ? Comment concevoir une approche durable ? Cet apprentissage peut, par exemple, permettre à chaque élève de savoir évaluer son impact environnemental, dont ses propres émissions à effet de serre.

Les éléments suivants, à compléter et développer, sont à prendre en compte pour enrichir des curricula sur la formation par l'ingénierie.

- *Activités manuelles et techniques*
 - Travail du bois
 - Travail des matériaux métalliques, des polymères et matériaux de synthèse
 - Travail des céramiques et matériaux de construction
 - Assemblage
 - Câblage électrique et électronique
 - Programmation d'automates, de régulateurs, de systèmes cyberphysiques
- *Démarche de conception technique*

- Analyser, comprendre et spécifier les besoins, expliciter les contraintes
- Fixer les objectifs relativement aux propriétés fonctionnelles et non fonctionnelles recherchées et quantifier les principaux paramètres
- Organiser le processus de conception et de réalisation, clarifier les dépendances
- Pratiquer les phases d'esquisse, de maquetage, de prototypage, d'optimisation et les évaluations associées
- Ethique, impacts sociaux et environnementaux d'un projet technique

Bien entendu, les points qui précèdent, donnés à titre indicatif, ne couvrent pas l'ensemble des sciences de l'ingénieur. De nombreux autres concepts peuvent être introduits très tôt à l'école, en particulier au titre des sciences de la matière et des sciences numériques.

4.4 Alphabétisation numérique

Les trois fondamentaux traditionnels de l'école sont *lire, écrire, compter*. Nous recommandons de les élargir et de les intégrer vers l'objectif ambitieux d'apprendre à *s'informer, s'exprimer et raisonner*.

Cette recommandation est motivée en particulier par le fait que les modalités d'accès à l'information et à la connaissance ont radicalement changé. Savoir lire est nécessaire mais loin d'être suffisant pour bénéficier de trésors de savoirs à portée de tous. Il en va de même de l'écriture sur un support inerte relativement aux possibilités d'expression, de communication et d'échange numériques. Compter, presque aussi bien que la calculette dans la poche de chacun, n'est plus une compétence opérationnelle pertinente.

Les trois fondamentaux que nous proposons sont une exigence pour l'école d'aujourd'hui, bien au-delà de l'enseignement des seules sciences. Cette exigence traduit l'ambition de former les jeunes à la réalité de leur époque, de leur donner les meilleurs atouts pour y faire face, pour devenir des futurs citoyens, responsables et autonomes, en mesure de pourvoir à leur développement humain et social, et au développement du pays, dans le respect de leur environnement.

La maîtrise des trois compétences fondamentales que nous proposons, *s'informer, s'exprimer, raisonner* passe par l'*alphabétisation numérique*. Voyons rapidement *qui* est concerné, en *quoi* consiste cette alphabétisation et *comment* l'enseigner.

L'alphabétisation numérique concerne tous les élèves à tous les cycles d'enseignement, de la maternelle au supérieur. Elle déborde largement du périmètre de l'école et doit être très présente dans le péri-scolaire, sans oublier la formation continue des adultes. Elle donne lieu pour tous à :

- Une familiarisation avec les *concepts* de base des outils numériques ;
- Une bonne maîtrise de l'*usage* de ces outils dans les activités quotidiennes, au sein et hors de l'école, de communication, d'échange et d'accès aux

informations et aux connaissances.

L'alphabétisation numérique est une notion débattue depuis plus de trente ans, avec de nombreuses initiatives et de larges déploiements pédagogiques de par le monde. Les syllabus sont désormais bien connus. De multiples publications (e.g., [34, 36, 38, 56]) en analysent les contenus, qu'il n'est pas nécessaire de développer en détail dans cette section synthétique.



FIGURE 16 – Ce ordinateur complet, de prix très modique, dont les logiciels sont à accès libre, a été développé spécifiquement pour encourager l'enseignement du numérique dans les pays en développement [71]. De nombreux processeurs similaires sont disponibles [72].

Les principales compétences généralement associées à l'alphabétisation numérique sont les suivantes :

- Comprendre les fonctions et l'organisation de base d'un ordinateur ;
- Comprendre les principaux types de documents (vocal, texte et hypertexte, table et relation, image, vidéo, etc.), leurs différences et leurs possibles organisations ;
- Comprendre les systèmes de gestion de répertoires et de fichiers ;
- Connaître les principales commandes d'un système d'exploitation ;
- Se familiariser avec les outils de recherche et les navigateurs web ;
- Savoir utiliser des éditeurs de textes et des éditeurs graphiques ;
- Maîtriser la messagerie électronique et les outils collaboratifs ;
- Savoir utiliser des éditeurs de pages web ;
- Avoir des notions sur les bases de données relationnelles et les tableurs ;
- Avoir des notions sur le respect des règles de sécurité et de confidentialité, les contraintes de streaming et de téléchargement ;
- Comprendre des rudiments sur les signaux, les canaux et protocoles de transmission, les codages et les compressions ;
- Avoir des notions sur la simulation et la visualisation de modèles.

Ces compétences sont à décliner en fonction du niveau de l'apprenant. Principalement intuitives, visuelles et graphiques au pré-scolaire, elles deviendront progressivement langagières, méthodologiques et techniques à l'école primaire, puis au collège et au lycée. Certaines notions, telles que les dernières de la précédente liste, ne seront abordées que dans le secondaire.

Soulignons que l'alphabétisation numérique s'intègre naturellement et amplifie l'alphabétisation tout court et l'apprentissage des langues. L'usage de claviers virtuels naturellement multi-alphabets (e.g., ceux des tablettes et ordinateurs à écran tactile), le maniement de dictionnaires et de thésaurus en ligne et de divers outils de vérification et de correction syntaxiques apportent des instruments efficaces pour des formations bilingues ou trilingues. Enfin, l'alphabétisation numérique, correctement enseignée, est un moyen puissant pour stimuler les *capacités créatives* de l'enfant et développer ses aptitudes d'observation, d'imagination et d'abstraction [84].

Terminons par quelques recommandations sur des approches pédagogiques pour aborder l'alphabétisation numérique :

- Privilégier les *accès ouverts*, au niveau de l'espace physique (salles constamment disponibles), de l'espace virtuel sur internet, mais également au niveau des contenus des documents, des codes et des cartes électroniques (par exemple celle en [Figure 16](#), plutôt qu'un boîtier hermétique).
- Favoriser les interactions sociales, l'apprentissage par des environnements ludiques, et l'utilisation d'outils collaboratifs.
- Pratiquer la formation par l'exemple au sein de petits groupes de travail interactif sur des problèmes et des questions pertinentes pour les élèves.
- Éviter les recettes du type "*clicotrôme*", éviter les leçons magistrales à apprendre par cœur et privilégier pour l'enseignant le rôle de l'encadrant à celui du professant.
- Encourager les clubs et camps de vacances proposant des activités d'alphabétisation numérique, à l'exemple du réseau mondial Dojo (cf. [Figure 17](#)), et d'autres initiatives similaires, en Afrique [73] ou en Europe [74].



FIGURE 17 – Dojo, un réseau mondial d'initiation gratuite à l'informatique [75]

5 Pédagogie active

L'enseignement scientifique est en mutation. La pédagogie traditionnelle, basée sur des cours magistraux épaulés par des travaux dirigés d'application et des travaux pratiques d'illustration, cède progressivement la place aux *pédagogies actives* qui favorisent l'autonomie des étudiants et leur implication dans le processus d'apprentissage. On peut ainsi citer *l'apprentissage par investigation scientifique* qui se généralise dans le secondaire [53], *l'apprentissage par problèmes et par projets* mis en place dans de grandes universités (e.g., [76]) ou encore les *classes inversées*. On parlera indifféremment dans la suite de pédagogie active ou d'apprentissage par investigation. Pour l'une comme pour l'autre, de nombreux travaux démontrent leurs effets bénéfiques dans les pays les plus avancés sur le plan éducatif [46]. Des études rigoureuses ont ainsi montré la supériorité de ces pédagogies, en termes d'apprentissage conceptuel ou d'acquisition de nouvelles compétences scientifiques :

- Trois années de travaux menées par le "Smithsonian Science Education Center" sur plus de 60.000 élèves des écoles primaires et collèges ont démontrés des bénéfices significatifs de l'apprentissage par investigation en science mais aussi dans l'acquisition des fondamentaux de lecture et écriture [59].
- L'analyse de [24], effectuée sur plus de 200 études, démontre des réductions substantielles des taux d'échec dues à la pédagogie active (cf. Figure 18).

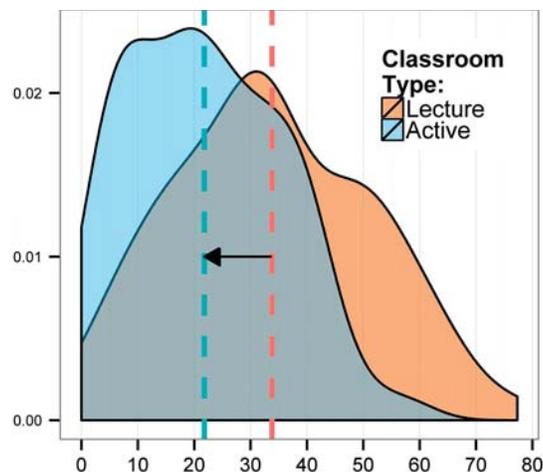


FIGURE 18 – Distributions des taux d'échec en premier cycle du supérieur pour des classes à cours traditionnels (orange) et celles utilisant diverses formes de pédagogie active (bleue) [24].

La mise en place de ces pédagogies implique des tâches nouvelles pour les élèves et les enseignants. Les élèves doivent devenir autonomes dans la production de solutions; ils travaillent généralement en collaboration sur

des périodes de temps plus ou moins étendues impliquant une activité en présentiel et à distance, synchrone ou asynchrone. Les enseignants doivent suivre, structurer et orienter le travail des étudiants tout en évitant d'imposer une méthode de résolution préétablie.

Ce type d'apprentissage, ses avantages, ses promesses, ses difficultés et ses limites seront discutés dans cette section. On tentera une mise en perspective, soulignant les rôles nouveaux et les compétences spécifiques qu'il exige des élèves et des enseignants.

Soulignons cependant, et sans ambiguïté, que cette approche n'exclue en aucune façon la nécessité et l'intérêt du cours magistral, notamment lorsqu'il s'agit de connaître le vocabulaire scientifique ou encore les conventions et l'utilisation des équipements. De fait, dans de nombreux cas, coupler transmission des savoirs et apprentissage actif constitue un passage obligé et une richesse dont on aurait tort de se priver.

5.1 Quelques notions de base

Pourquoi la pédagogie active ? Les avantages sont nombreux et nous en soulignons deux. D'abord, la démarche par investigation, notamment dans l'enseignement des sciences, a démontré sa capacité à accroître l'intérêt des élèves, et ce dès le primaire, et à améliorer sensiblement leur niveau de réussite [22, 23]. Il est en effet essentiel de multiplier les expériences positives avec la science dès le plus jeune âge pour construire des attitudes futures sans a priori négatifs envers la science.

Par ailleurs, la pédagogie active permet de renforcer la motivation des enseignants, qui sont bien évidemment les pivots sur lequel se construira le renouvellement de l'enseignement scientifique. Elle leur permet de s'intégrer dans des réseaux stimulants, allant des entreprises aux universités en passant par les collectivités locales et les associations de parents. Les collaborations professionnelles leur permettent d'échanger idées et expériences, d'enrichir leur réflexion, et de s'extraire d'un isolement parfois pesant face à leur classe, leur donnant ainsi l'opportunité de parfaire leur formation et leur développement professionnel.

Qu'est-ce que la pédagogie active ? Le monde change vite. L'accroissement des savoirs et des connaissances est tel qu'il faut sans cesse questionner la pertinence des programmes d'enseignement, notamment en sciences et techniques. Selon l'OCDE, "les élèves ne peuvent pas apprendre tout ce dont ils auront besoin à l'âge adulte. Ce qu'ils doivent acquérir, ce sont les conditions préalables à la réussite de l'apprentissage dans l'avenir". C'est là l'objectif principal de la pédagogie active.

Il ne s'agit pas d'un concept nouveau, loin s'en faut. Dès le début du vingtième siècle, Piaget [47] ou encore Dewey [21] soulignent le rôle de la

curiosité, de l'imagination et du questionnement interactif pour un apprentissage efficace des enfants. Cette reconnaissance du rôle actif des apprenants dans le développement de leur capacité de réflexion est confirmée par moult travaux. Ainsi, le National Research Council [40] ou la National Science Foundation [44] aux Etats-Unis, l'Académie des sciences en France avec "La main à la pâte" [14], et plus récemment le Programme de l'enseignement des sciences de l'IAP [62], s'accordent à définir la pédagogie d'investigation dans l'enseignement des sciences comme suit :

"La recherche d'un développement progressif d'idées scientifiques fondamentales chez les élèves, grâce à l'apprentissage de l'investigation et de la construction de connaissances, afin de comprendre le monde qui les entoure. Les élèves appliquent les compétences utilisées par les scientifiques telles que le questionnement, la collecte de données, le raisonnement et l'examen des preuves à la lumière des connaissances disponibles, l'établissement de conclusions et la discussion des résultats. Ce processus d'apprentissage est soutenu par une pédagogie d'investigation qui comprend non seulement l'acte d'enseigner, mais aussi ses justifications sous-jacentes."

Quels objectifs de savoirs et de compétences à acquérir ? L'expérimentation et la participation actives sont au cœur de l'apprentissage scientifique. Elles sont essentielles à la compréhension des concepts qui régissent le fonctionnement du monde dans lequel évolue l'élève. En posant et en se posant des questions, en testant les réponses, l'élève va tirer des conclusions, parfois en contradiction avec ses a priori, avec les idées et représentations initiales qu'il avait. Il va peu à peu enrichir ses connaissances. Il doit pour cela être partie prenante du processus, et ce, dès le choix de la question qui sera au centre de son travail, et qu'il devra s'approprier pour mieux réfléchir à ce qui est recherché et à la manière de procéder pour y répondre au mieux. L'enseignement scientifique devra ainsi permettre aux élèves d'être acteur de leur apprentissage et de développer des compétences tout au long de leur vie.

Précisons les termes essentiels de la définition de l'IAP rappelée ci-dessus :

- *Le développement progressif d'idées scientifiques fondamentales ; l'apprentissage de l'investigation et de la construction de connaissances, afin de comprendre le monde qui les entoure :*
Il s'agit pour les élèves de construire leur culture scientifique, de saisir les grandes lignes de pensée, d'identifier des idées essentielles pour donner du sens aux phénomènes et pour appréhender leur environnement dans sa globalité. Il s'agit également de progresser dans l'élaboration de leurs connaissances et de leurs compétences à travers leur participation active à leur formation.
- *L'application de compétences transversales utilisées par les scientifiques :*
Un scientifique collecte des données, les vérifie, les répète, propose des in-

interprétations de ses résultats, les compare à ceux publiés par ses pairs, les communique enfin dans des journaux ou des conférences spécialisés. Tout au long de ce processus d'investigation, le rôle de la preuve scientifique est central et l'exigence de rigueur et d'honnêteté une qualité essentielle. Notons que de manière sous-jacente, la capacité à communiquer ses résultats, auprès d'autres scientifiques par exemple, sous-entend la capacité de développer des compétences en matière de représentation mentale, d'argumentation, de discussion et donc de langage, tant écrit qu'oral. Développer ces compétences, dès le plus jeune âge, est un atout indéniable pour les élèves dans l'élaboration et le développement de leurs connaissances et de leur discernement face aux questionnements qui se poseront à eux tout au long de leur vie, personnelle et professionnelle.

Il apparaît ainsi que l'investigation scientifique met en jeu et permet de développer un grand nombre de compétences : questionner, suggérer, analyser des données, apporter la preuve de ses affirmations, observer avec précision, etc., pour au final collecter des informations cohérentes, susceptibles de permettre la résolution de la question posée.

Cet apprentissage est loin d'être exclusivement pratique. Il exige également de raisonner, discuter, débattre, coopérer, rédiger, réfléchir et finalement mettre en commun. Le partage des idées, la transcription des investigations et la communication des conclusions, par l'oral et par l'écrit, est une occasion d'apprendre à exposer, à argumenter, à écouter les autres, à débattre, et à voir qu'il existe différentes façons d'aborder le même problème.

Les connaissances et les compétences ainsi acquises conduisent dans la quasi-totalité des cas à une meilleure compréhension du sujet, à un enrichissement du savoir, voire à une évolution du point de vue initial de l'élève.

L'apprentissage par investigation apparaît ainsi comme un processus où connaissance, compréhension, questionnement et communication sont intimement liés et se nourrissent les uns les autres dans une interaction permanente, nécessitant un investissement effectif tant de l'apprenant que de l'enseignant. Les compétences nécessaires ainsi que celles qui sont acquises par un tel apprentissage, ne se limitent pas aux compétences scientifiques. Elles intègrent de fait de nombreuses autres compétences, dont la communication écrite et orale, la capacité à raisonner ou encore à s'auto-évaluer. Nous aurons l'occasion d'y revenir plus loin.

5.2 Mise en œuvre pratique

Ce qu'on peut demander aux élèves est seulement limité par notre imagination. Répondre à une question, expliquer un concept complexe ou un phénomène physique en des termes qu'un élève puisse comprendre, dessiner un circuit électrique, un organigramme ou encore une carte conceptuelle, résoudre un problème, en expliquer la solution, anticiper ou interpréter le résultat d'une expérience, critiquer un article ou un rapport, réparer un ap-

pareil défectueux, et, pourquoi pas, poser une question sur le cours magistral qui vient d'être présenté.

On pourrait continuer à l'infini cette liste, l'idée centrale étant que le choix de la question de départ, doit susciter l'intérêt et la curiosité de l'élève pour solliciter sa participation active et effective.

Cela peut paraître simple. Ce point de départ, cette question, est cependant déterminante pour le bon déroulement de la session. Elle doit être suffisamment ouverte pour amener le questionnement et le débat. Elle doit déboucher sur des réponses accessibles aux élèves et cohérentes avec les objectifs d'apprentissage inscrits aux programmes. Elle doit également être suffisamment précise, si possible ancrée dans une situation concrète, afin que les questions ne fusent pas dans toutes les directions et soient productives, permettant effectivement d'intéresser les élèves, de susciter leur engagement, leurs initiatives et au final leur progression sur la voie de la connaissance.

Quels formats adopter pour mener les activités d'apprentissage ?

Les activités peuvent être individuelles. La structure d'apprentissage actif de base privilégiera cependant les activités en groupe de deux à quatre personnes. Au-delà de ce nombre le risque est que certains élèves se trouvent exclus des échanges. Pour chaque groupe un rapporteur pourra être choisi par l'enseignant ou par le groupe lui-même.

Quelle que soit la question posée ou l'action à mener, il faut laisser un temps suffisant à l'expression de la curiosité des élèves, à leurs interrogations et à la réalisation de progrès palpables vers la résolution. Au primaire et au collège, ce temps ne devrait pas dépasser 5 minutes. Au-delà, on peut diviser la question en plusieurs étapes chacune pouvant alors représenter une activité à part entière. Au lycée et à l'université, la pratique d'apprentissage actif étant a priori rodée par les élèves, ce temps pourra alors être plus long.

A l'issue de ce temps d'échange, chaque groupe présente à la classe ses réponses, et la discussion sur les différentes approches peuvent alors prendre place. Eventuellement, un cours prenant appui sur les réponses suggérées peut être effectué.

La pédagogie active transforme la classe en un atelier de pratique plutôt qu'un lieu de cours magistraux et de prise de notes. Elle conduit à inverser l'équation traditionnelle des "*cours en classe et exercices chez soi*"²⁸. Elle se nourrit d'un *apprentissage par projets*, menés par les élèves en petits groupes et sur lesquels ils progressent, dans et hors de l'école, avec beaucoup d'autonomie. Il peut s'agir, par exemple :

- de projets techniques : la construction d'une serre, d'un four solaire, d'une pompe photovoltaïque et à éolienne ; la réalisation d'un logiciel de jeu

28. C'est la notion de *classe inversée*, qui insiste sur l'engagement actif de l'élève, et sur une adaptation de l'enseignement et un suivi de chacun.

vidéo, d'organisation d'un tournoi sportif, ou du transport partagé des élèves à l'école ;

- de projets d'observation de l'environnement : les migrations d'oiseaux, l'évolution des chenilles en papillons, ou celle du niveau d'un cours d'eau dans l'année.

Ces projets peuvent être ponctuels ou plus larges et impliquer un *réseau de classes* sur une région, des clubs scientifiques, voire les familles. Ils peuvent mettre en œuvre des enquêtes sociales. Ils gagnent à donner lieu à une communication sur un site internet et à bénéficier de reconnaissance et de visibilité.

Des variantes de cette approche de base existent bien évidemment. Il est ainsi possible de :

- Travailler individuellement, puis former des binômes, puis coupler les binômes pour enrichir et améliorer avant de partager les réponses et de construire une solution. L'intérêt du temps de travail individuel est un apprentissage encore plus efficace.
- Proposer un QCM avec des réponses correctes et des réponses incorrectes qui reflètent les idées fausses communes des élèves. Afficher les réponses de la classe sur un histogramme. Les élèves peuvent ensuite former des binômes, discuter de leurs réponses et proposer une nouvelle réponse au QCM après en avoir discuté. Au final, la discussion collégiale doit permettre de justifier les bonnes réponses, mais surtout d'expliquer pourquoi les réponses fausses le sont.
- Former des binômes où un des membres joue le rôle de l'enseignant et l'autre celui de l'élève. Le "rôle enseignant" explique le problème en 2 ou 3 minutes et le "rôle élève" pose des questions lorsque les explications ne sont pas claires. Après le temps alloué à l'échange, le travail des binômes est arrêté et plusieurs élèves sont invités à présenter ce qu'ils ont compris ou retenu à l'enseignant. Celui-ci va clarifier le débat, fournir de nouvelles pistes, puis le travail se poursuivra dans les binômes, éventuellement en échangeant les rôles enseignant-élève, jusqu'à ce que les explications fournies à l'enseignant en fin de débat soient jugées, par lui, satisfaisantes.

Cette liste n'est pas exhaustive. On peut bien sûr imaginer une multitude d'autres situations pour structurer l'apprentissage actif.

5.3 Stratégies pour un apprentissage actif

Mettre en place une pédagogie active vise à rendre les élèves de plus en plus autonomes dans leur façon d'apprendre et d'élaborer des idées qui leurs soient personnelles. Le format des activités exige un environnement propice, permettant des échanges conviviaux par petits groupes, sans doute un réaménagement de l'espace classe, de nouveaux matériels et de nouvelles

ressources. Cependant, ce qui reste absolument déterminant dans l'expérience et l'apprentissage des élèves, la clef de voute, est l'interaction entre l'enseignant et ses élèves.

On n'abordera pas ici les obstacles liés à la formation et à l'accompagnement des enseignants, absolument nécessaires si l'on souhaite transformer les pratiques pédagogiques. On présentera exclusivement, dans le cas idéal d'enseignants formés et de ressources adéquates, le rôle de l'enseignant et quelques-unes des stratégies pédagogiques à mettre en œuvre pour un enseignement fondé sur l'apprentissage actif.

L'enseignant est un référent et un guide tout au long du processus. Il doit en particulier assurer les tâches suivantes.

Maintenir une ambiance de travail constructive et sereine. Ce point peut paraître anodin. Cependant, dans un travail où l'élève doit avancer en multipliant les essais et en partageant ses idées, l'élève sera forcément confronté à ses erreurs et à ses limites. Il peut s'en trouver fragilisé, être réticent à s'exprimer et être bloqué de ce fait dans son processus d'apprentissage. Certains élèves peuvent avoir tendance à imposer leur point de vue, à écarter les filles des activités pratiques. Le rôle de l'enseignant est d'assurer le bien-être de tous les élèves, dans le respect mutuel des spécificités de chacun. La première règle consiste à constituer des groupes de petite taille (4 élèves au maximum), de donner un rôle à chaque membre du groupe pour faciliter la collaboration (secrétaire, responsable du matériel, rapporteur), d'établir des règles de fonctionnement claires et explicites (écoute, partage du matériel).

Soulever des questions qui font sens. Jos Elstgeest affirme [31] : *“Une bonne question est la première étape vers la réponse ; c'est un problème pour lequel il existe une solution. Une bonne question doit être stimulante, une invitation à un examen plus attentif, à une nouvelle expérimentation ou à un nouvel exercice. J'appellerai ces questions des questions “productives” car elles stimulent une activité productive”*. Soulignons que les questions productives amènent à un raisonnement progressif et approfondi, alors que les questions non productives appellent une réponse courte : Quel est le nom de cet objet ? De combien d'échantillons disposons-nous ?

L'art de l'enseignant est de construire avec soin des questions productives. Nous l'avons suggéré plus haut, la question posée doit être suffisamment précise pour orienter la recherche et le questionnement des élèves et en parallèle, elle se doit d'être suffisamment ouverte pour les inciter à l'investigation. Ainsi, “Quelles parties de la plante se développent lorsqu'elle grandit ?” est une question moins productive que “Comment pourrions-nous, selon vous, décrire le cycle de vie d'une plante ?”.

Pour aider les élèves à construire leurs réponses de manière productive, l'enseignant pourra utiliser des questions types telles que :

- Selon vous, que se passerait-il si ... ?
- Comment pensez-vous vous y prendre pour ... ?
- A votre avis, pourquoi ces résultats sont différents de ceux des autres essais ?

En utilisant “selon vous”, “pensez-vous” ou encore “à votre avis” l’enseignant souligne qu’il ne demande pas la bonne réponse à l’élève mais qu’il souhaite connaître son opinion.

L’enseignant pourra bien sûr s’exercer à rechercher des questions productives hors de sa classe. Les livres des sciences à destination des enfants sont en ce sens une mine d’information. Néanmoins, la formation des enseignants et le travail en réseau des professeurs constituent une aide inestimable pour avancer dans cette pratique.

Organiser les débats. Il peut être difficile pour un élève de s’adresser à ses pairs, de prendre la parole, d’entendre les idées des autres élèves, de discuter de faits auxquels il n’avait pas pensé, d’être d’accord sur les conclusions.

Le rôle de l’enseignant est essentiel pour amener l’ensemble des élèves à prendre part au débat et à dépasser leurs difficultés :

- Par l’aménagement des groupes d’abord. Dans la mesure du possible, il n’y aura pas de premier ou de dernier rang. Les élèves seront placés en cercle de manière à pouvoir se voir et interagir.
- Par le choix du rythme : réfléchir quelques secondes avant de répondre peut aider certains élèves à organiser leur intervention, faire émerger de nouvelles idées ou approfondir un point de débat.
- Par une parole rare : l’enseignant guide et ne parle qu’à bon escient. Il ne doit pas être celui qui pose toutes les questions ni fournir les “bonnes réponses”. Mais il doit être vigilant et encourager les élèves à poursuivre le débat : intervenir pour aider les élèves à sortir d’un désaccord qui les empêche de progresser, par des commentaires tels que : “nous devrions essayer de ...”, “comment faire pour être sûr?”, etc.

Dans le déroulement de la session, il n’est pas rare que les représentations initiales, souvent naïves notamment chez les enfants des écoles primaires, soient mises en défaut par le raisonnement et les discussions de la classe. Il est important que l’enseignant les guide vers une représentation exacte et il sera aidé en cela par le processus de participation active de l’élève, qui le conduira aisément à changer de point de vue, puisqu’il aura pu constater les faits par lui-même.

Par ailleurs, lors des débats émergeront couramment des questions auxquelles l’enseignant ne pourra pas répondre. Il faut cependant qu’elles soient prises en compte et que l’enseignant, dans une démarche pro-active à laquelle il associera ses élèves, cherche la réponse par l’utilisation de sources documentaires (livres, internet, vidéos) ou le recours à des spécialistes.

Les ressources pédagogiques sont en effet nécessaires à la mise en œuvre de la pédagogie active et les possibilités sont immenses. Ainsi, les bibliothèques restent un moyen formidable de découverte et d'émerveillement. Les ressources numériques à accès ouvert sont d'une très grande richesse. A titre d'exemple le site de la fondation *La main à la pâte* [63] comporte un éventail très large d'outils pédagogiques pour les enseignants pour les différents niveaux à partir de la maternelle. La constitution de fonds d'ouvrages et de médias de référence est nécessaire. L'enseignement des sciences en anglais, comme le préconise à terme le CSEFRS, ouvre l'accès à bien plus de ressources et de documents que toutes les autres langues. Des supports pour le développement d'activités manuelles et techniques, de logiciels et de ressources numériques sont indispensables. Notons enfin que les possibilités d'impression 3D offrent des perspectives intéressantes pour favoriser la créativité dans la réalisation d'outils pédagogiques et de moyens d'expérimentation. Enfin, les *activités parascolaires*, à buts ludiques, de découverte libre et d'épanouissement personnel, contribuent fortement au développement et à la formation de l'enfant.

Quels que soient les moyens déployés, l'objectif reste le même : servir l'investigation des élèves et leur permettre d'aiguiser leur regard pour exploiter les ressources à bon escient, sans pour autant perturber ou se substituer à leur activité d'expérimentation ou d'observation. Là encore le rôle de l'enseignant apparaît comme étant crucial pour guider une prise d'information efficace. Il devra isoler dans les documents, quel qu'en soit le support, des passages qui font sens, éviter la surcharge de détail, privilégier le fond sur la forme. Il devra choisir le moment auquel un document sera utilisé : déclencher la question, apporter de premiers éléments de réponse, valider ou infirmer une hypothèse, faire évoluer l'investigation, ou illustrer les connaissances.

Accompagner le passage à l'écrit. Texte, dessins, schémas, tableaux, ou graphiques, le passage à l'écrit permet aux élèves de suivre leur progression, de clarifier et d'organiser leurs idées, de produire les documents nécessaires à la présentation de leur travail. Il permet par ailleurs à l'enseignant de comprendre la progression des élèves, d'évaluer ce qu'ils ont compris et d'adapter son enseignement de manière à renforcer les notions non acquises.

Le rôle de l'enseignant est également d'accompagner chaque étape écrite de l'investigation. Expliquer qu'il n'est pas nécessaire de tout rédiger, aider les élèves à choisir les informations pertinentes et à mettre leurs idées en commun. Les amener à faire évoluer leurs écrits, à organiser leurs données, les questionner sur leurs hypothèses.

L'enseignant pourra également donner le tempo de l'investigation : consacrer du temps à chaque étape importante comme identifier un objectif, décrire un protocole, noter un résultat ou encore proposer une conclusion.

La rédaction d'un compte rendu est également une étape importante

pour laquelle l'enseignant joue un rôle pivot. Il proposera des modèles et des structures types de présentation pour les guider sans pour autant brider leur réflexion. Il leur fera prendre conscience de l'utilité de la prise de note en vue d'élaborer leur compte rendu : pouvoir revenir sur leur travail, pouvoir comparer leurs résultats avec ceux d'autres élèves, modifier et approfondir leur raisonnement, trouver les preuves et argumenter leurs résultats.

Les élèves seront ainsi persuadés que l'écrit n'est pas qu'une contrainte destinée à l'évaluation de leur travail et de leur progression par l'enseignant mais que ce travail de rédaction représente un véritable outil productif, qu'ils pourront utiliser tout au long de leur apprentissage scientifique.

Sur la base de ce travail, l'enseignant fera également émerger des conclusions collectives, construites sur la pensée de l'ensemble de la classe, et conformes aux savoirs de la communauté scientifique.

L'évaluation. A la différence de l'évaluation dite *sommative*, qui intervient à la fin d'une séquence, l'évaluation privilégiée dans les modes d'apprentissage actif, dite *formative*, a lieu en continu durant toute la séquence. Ce type d'évaluation permet d'une part de guider les élèves dans leur apprentissage à l'aide de questions et de commentaires de l'enseignant. D'autre part, elle est utile à l'enseignant. Elle lui permet de comprendre la démarche d'investigation des élèves, leur capacité à raisonner de manière scientifique et d'identifier ce qui reste confus pour eux. Il peut ainsi orienter et adapter son enseignement en permanence pour répondre aux besoins des élèves.

Différentes stratégies peuvent être mises en œuvre. Pour les travaux écrits, il s'agira notamment de collecter les données rédigées par les élèves. Les observations exprimées à l'oral devront être gérées en temps réel sur des fiches, un cahier, ou un tableau.

L'objectif de l'enseignant sera alors de prendre des notes rapides, de rédiger des commentaires pour chaque élément évalué, et de pouvoir ensuite les analyser et les organiser pour avoir une vision claire des notions et des compétences correctement acquises ou non acquises par chaque élève. L'enseignant sera alors en mesure d'adapter son enseignement pour atteindre son objectif.

Cette étape d'évaluation est déterminante bien que souvent assez complexe, notamment parce qu'il est impossible de tenir compte de la spécificité de chaque élève. Un tel a du mal à l'écrit, tel autre s'exprime avec difficultés mais n'a pas de difficultés à appréhender les apprentissages scientifiques. Souvent, les compétences en communication ou en langue doivent être améliorées. Mais la compréhension des sciences peut également être en cause.

Les enseignants pourront développer leurs propres stratégies d'évaluation formative. Soulignons cependant qu'il existe de nombreuses aides et exemples, prêts à être utilisés ou adaptés, sur internet par exemple. Tous mettent en évidence la nécessité d'identifier les compétences à évaluer et

de les planifier. Les élèves pourront être partie prenante de l'évaluation, comprendre les objectifs de leur travail et être encouragés, grâce aux commentaires de l'enseignant, dans leur réflexion sur ce qu'ils doivent faire pour progresser dans leur apprentissage, sans être comparés aux autres élèves. Ce qui est visé c'est l'évaluation fiable d'objectifs généraux plutôt que d'activités spécifiques, afin que chaque élève ait une réelle occasion d'évoluer et de s'améliorer.

5.4 Conclusion

Notre objectif dans cette section était de mettre en exergue les principes et les stratégies de base pour la mise en œuvre d'une pédagogie active pour l'enseignement des sciences. L'intérêt et la plus-value pour les élèves sont soulignés par toutes les expériences menées jusqu'à présent. Elles mettent par ailleurs en évidence la nécessité d'accompagner les enseignants, dans la compréhension qu'ils ont des sujets scientifiques abordés et dans le processus d'évaluation, mais également dans la résolution de difficultés liées au manque de temps, de ressources, d'espace, pour couvrir des programmes trop souvent surchargés. La formation professionnelle aux nouvelles pratiques pédagogiques et les choix d'orientation effectués en amont de l'école doivent pour cela être au centre des préoccupations.

Cependant, il ne s'agissait dans cette section d'être exhaustif sur les méthodes de pédagogie active, ni d'en donner un guide de mise en œuvre opérationnel.²⁹ Il ne s'agissait pas non plus de développer d'innombrables exemples et pratiques pouvant accompagner cette pédagogie. Il existe en effet de nombreuses initiatives de renouveau des pratiques de l'enseignement des sciences dont on pourra s'inspirer ou qu'on pourra rejoindre avec succès.

En Europe, "Pollen" [77], "Sinus-Transfer" [78], et "La main à la pâte" [63] sont les plus anciennes et les plus abouties. Elles ont démontré leur capacité à accroître l'intérêt et les résultats des élèves du primaire et du secondaire dans le domaine des sciences. Leurs points communs sont d'abord de proposer une pédagogie innovante sans interférer avec les programmes. Elles proposent des processus et des méthodes à mettre en œuvre. Elles mettent en avant de nombreuses pratiques et activités concrètes, manuelles et intellectuelles, individuelles et par groupes. Elles insistent sur l'importance de la formation, l'accompagnement et la motivation des enseignants, en facilitant leur mise en réseau, facteur essentiel de promotion et de qualité. Ces initiatives soulignent également l'importance des interactions entre élèves, enseignants, parents, et acteurs du monde socio-économique. Enfin, Pollen en particulier a montré sa flexibilité, sa démarche pouvant être mise en œuvre de façon adaptée, en particulier dans le respect des spécificités locales et nationales.

29. Cf. par exemple le guide proposé dans [55, chapitre 1].

6 Recommandations

Les perspectives défendues dans ce rapport correspondent à une ambition majeure pour notre pays. Leur réalisation devra s'appuyer sur une stratégie cohérente, soutenue à long terme, constamment affinée et évaluée.

On formule tout au long du rapport plusieurs recommandations pour la définition détaillée de cette stratégie et sa mise en œuvre. Ces recommandations sont brièvement récapitulées ici. Elles sont relatives à *(i)* l'enseignement des sciences, *(ii)* la formation des enseignants, *(iii)* l'environnement éducatif, et *(iv)* l'accompagnement social. Elles sont bien entendu non exhaustives. Elles nécessitent d'être traduites en actions opérationnelles via, par exemple, les mesures préconisées pour la poursuite de ce travail (cf. [sous-section 1.4](#)).

6.1 Enseignement des sciences

Ce rapport exhorte toutes les parties concernées de faire de l'enseignement des sciences, de l'ingénierie et des mathématiques au Maroc un vecteur essentiel de formation humaine *par* la démarche scientifique. Il s'agit de développer cette formation en couplant constamment les trois dimensions des *principes*, des *méthodes*, et des *matières* scientifiques. Il préconise de mettre en œuvre une *pédagogie active* conjuguant *l'investigation*, *la conception* et *l'évaluation*.

En termes d'objectifs, on recommande d'intégrer les fondamentaux classiques de *lire*, *écrire*, *compter* vers l'objectif plus ambitieux d'*apprendre* à *s'informer*, *s'exprimer* et *raisonner*, et de s'appuyer pour cela sur une généralisation l'*alphabétisation numérique*.

Le rapport propose *d'alléger les curricula* avec des contenus ouverts, qui sont des supports et des vecteurs de formation par la démarche scientifique, tout autant qu'une initiation aux concepts de base des sciences. Il s'agit d'éviter les curricula sous forme de collections de chapitres et matériaux à couvrir impérativement durant l'année, au profit de larges options de concepts et d'illustrations à choisir par l'établissement, l'enseignant et sa classe. On préconise de privilégier l'*évaluation formative des compétences*, en continu et à livres ouverts, et d'éviter à tous les niveaux le cours magistral et la prise de notes en classe. On recommande de développer l'apprentissage par projets, ateliers et activités de groupe, et de privilégier dans le cadre de tels projets l'*interdisciplinarité* sur quelques problèmes concrets, proches du vécu et des intérêts des élèves. Bien entendu, il est important de traduire ce qui précède en recommandations aux auteurs et éditeurs des manuels scolaires, voire en critères pour l'homologation de ces manuels.

Il est également recommandé de renforcer substantiellement les activités scientifiques au pré-scolaire et à l'école primaire, sous des formes ludiques et très concrètes, en évitant les abstractions et formalisations mathématiques précoces. On conseille fortement d'encourager des activités de *recherche libre*

de l'enfant dès la fin du primaire et tout au long du secondaire, en particulier sur des tâches de documentation scientifique, mais aussi de conception et de réalisation technique. On invite l'école et l'enseignant à *donner goût aux sciences* tout au long de la scolarité, et à ne pas hésiter à "mettre en scène" l'expérience scientifique.

Enfin, le rapport argumente en faveur d'une présence des sciences dans les enseignements des lettres et des humanités, par exemple par l'étude des grands textes de la littérature scientifique, de l'histoire des idées et des grandes figures scientifiques, et des liens féconds entre arts et sciences.

6.2 Formation des formateurs

Sur ce point essentiel, on recommande d'expliquer largement et faire adhérer tous les acteurs de l'enseignement aux objectifs, défendus ici, de formation humaine de tous les jeunes marocains par la démarche scientifique. On préconise d'accompagner par toutes mesures possibles les acteurs de l'enseignement vers la mise en œuvre d'une *pédagogie active*, associée à des méthodes d'évaluation formative. Il s'agit de développer, en enseignement initial et continu, la formation des enseignants scientifiques aux *principes et méthodes* de la démarche scientifique, y compris sur les questions d'épistémologie et d'éthique des sciences.

On préconise de créer ou de renforcer la *formation continue à la culture scientifique* pour tous les enseignants, en particulier ceux du primaire et pour les enseignants des humanités (langues, histoire, arts). Il s'agit aussi d'enrichir la culture des enseignants des sciences sur d'autres disciplines que la leur, par exemple les enseignants de mathématiques sur les sciences de la vie ou les sciences de la terre et de l'univers. On conseille d'éviter le cloisonnement disciplinaire et la spécialisation des enseignants, par exemple par le regroupement (au moins jusqu'au collège) des sciences empiriques ou expérimentales d'un côté et des sciences formelles (mathématiques et sciences numériques) de l'autre, en insistant sur l'interdisciplinarité à tous les niveaux.

Le rapport propose d'encourager la constitution ou le renforcement de réseaux pédagogiques des acteurs de l'enseignement sous diverses formes (organisation de rencontres, de sites internet, etc.), pour l'échange d'expériences, l'enrichissement mutuel, l'élaboration de projets conjoints. La participation active de chercheurs et d'universitaires à ces réseaux doit être fortement encouragée.

Enfin, on recommande d'associer les étudiants de l'enseignement supérieur au soutien et à l'encadrement, en particulier dans le secondaire, pour mener des projets, des ateliers et activités de groupe, ce qui apporterait une aide et une ouverture à l'école, mais également permettrait de susciter des vocations et des innovations pédagogiques.

6.3 Environnement éducatif

Une recommandation essentielle sur ce point est de rendre l'*environnement scolaire attractif* avec des ressources pédagogiques et ludiques à accès ouvert et largement diffusées. Ainsi, il faudrait constituer à divers niveaux des fonds d'ouvrages et de médias de référence, et exploiter les possibilités d'impression 3D pour la réalisation d'outils pédagogiques et de moyens expérimentaux, en formant les enseignants à l'utilisation de ces ressources.

Le rapport invite à respecter la spécificité de chaque région, à laisser leurs établissements libres de leurs choix en termes de projets pédagogiques et d'ateliers à développer (interactions avec les problèmes de l'énergie solaire pour certains, éoliens pour d'autres, traitement des déchets, etc.). Cela créera un engagement des acteurs et une émulation bénéfiques. Dans ce sens on propose d'*identifier des sites pilotes* dans des zones localisées où une bonne dynamique préexiste, en vue de mener des actions visant un progrès rapide, avec un objectif quantifié et un suivi serré permettant une adaptation aux difficultés rencontrées et une émergence d'expériences réussies pouvant être mises à l'échelle.

On préconise de soutenir les initiatives des enseignants et leurs projets de recherche pédagogique et de didactique des sciences, de leur ouvrir, via ces travaux personnels et d'équipes, des diplômes supérieurs (troisième cycle universitaire, doctorat) et des voies de promotion. Leurs *expérimentations innovantes et leurs réseaux pédagogiques*, par exemple pour l'intégration du numérique et des MOOC à l'école, doivent pouvoir trouver appui et accompagnement.

Le rapport invite à encourager les *partages en réseaux et les déploiements régionaux* des ressources. Le développement de mallettes pédagogiques et l'équipement de bus de la science, laboratoires ambulants qui peuvent sillonner les zones les plus reculées, sont des vecteurs de formation et de dynamisation autour de l'enseignement des sciences. Il faut stimuler les bonnes pratiques et favoriser la capitalisation et le partage des expériences réussies. Il est nécessaire de créer une bonne émulation et de reconnaître les efforts des tous, élèves, enseignants et établissements, par exemple via des compétitions, des prix et ressources de complémentaires, associés à une forte médiatisation.

6.4 Accompagnement social

De nombreuses mesures d'accompagnement social de la réforme de l'enseignement des sciences sont nécessaires, parmi lesquelles on recommande en particulier de *communiquer auprès de la société et du grand public* sur une vision positive des sciences et pour une meilleure compréhension à la fois de ce qu'est l'enseignement des sciences et des bienfaits de cet enseignement.

Cette communication grand public est très insuffisante au Maroc.³⁰ Il est essentiel que les familles perçoivent que les sciences ne sont pas réservées à une élite mais que leur enseignement joue un rôle fondamental dans le développement de leurs enfants et l'évolution de la société. Il est par ailleurs critique de valoriser moralement et matériellement les métiers et les activités scientifiques, de combattre l'image du scientifique travaillant dur et mal payé dans une société saturée de publicité consumériste.

On propose de sensibiliser largement aux enjeux de l'amélioration de l'enseignement des sciences et aux défis collectifs pour y arriver. Une large mobilisation au travers de partenariats entre organes publics, fondations, centres de recherche, universités, ONG et entreprises, serait nécessaire pour mobiliser les moyens humains et matériels en vue de progrès rapides.

Ce rapport préconise d'inciter les municipalités et les collectivités régionales à investir dans des actions de diffusion de la culture scientifique sous diverses formes : musées et parcs des sciences, événements réguliers ou focalisés, expositions, conférences et projections gratuites pour les jeunes et le grand public, etc. On propose de mobiliser les entreprises dans l'effort national de formation scientifique par des mesures incitatives morales, voire fiscales. Il s'agit d'encourager leurs actions de parrainage d'écoles, de partenariats sur des projets généraux ou relatifs aux activités ou à l'environnement de l'entreprise, d'offre de stages et de tutorats de groupes et de projets par les cadres de l'entreprise. Il faudrait également mobiliser les associations culturelles, sportives, de quartiers et les comités sociaux des entreprises, et soutenir leurs initiatives de clubs et de camps de vacances scientifiques, et d'animation sur des événements scientifiques.

On invite fortement à associer sous diverses formes les familles au projet pédagogique de l'école et à la démarche conjuguant les principes, les méthodes et les matières scientifiques.

On propose de promouvoir une *semaine de la science* par de nombreuses initiatives et portes ouvertes de laboratoires, d'entreprises, d'écoles et lycées, et des activités destinées aux jeunes et au grand public. Il serait enfin très fructueux d'organiser chaque année un grand événement national sur la science.³¹ Durant un tel événement (à l'instar d'autres similaires dans le monde, e.g., [79]), les plus hautes autorités du royaume pourraient par exemple recevoir des jeunes écoliers, des lycéens et leurs enseignants, qui se sont distingués par des projets scientifiques et techniques socialement bénéfiques, pour leur accorder récompenses et visibilité.

30. La science est aujourd'hui quasi absente de la télévision marocaine, alors que des ressources considérables à faible coût sont largement disponibles. Il faut viser un objectif ambitieux d'au moins 20 à 25% du temps de diffusion à large écoute réservé à la communication scientifique. De même, très rares sont les rues et avenues dans nos villes qui honorent des scientifiques (e.g., chercher l'avenue Ibn Al Banna dans sa ville natale).

31. La *Journée mondiale de la science pour la paix et le développement*, les 10 novembre, pourrait en être l'occasion.

Annexes

A Sciences du vivant

A.1 Introduction

Plusieurs pays ont consacré depuis deux ou trois décennies des efforts substantielles et engagés d'importantes réformes pour améliorer leur enseignement des sciences. L'exemple des USA sur ce point est particulièrement instructif, aussi bien en termes d'approches participatives, de méthodes pour la définition des objectifs et pour leur mise en œuvre, qu'en termes de la qualité des documents résultants de ces efforts. Cette annexe est principalement inspirée des nombreux travaux coordonnés et publiés dans ce cadre par le National Research Council (NRC) et l'Inter Academy Panel (IAP). Il s'agit en particulier des documents suivants :

- Identification des principes et grandes idées pour l'enseignement des sciences [30, 32].
- Développement d'un cadre pour l'enseignement des sciences durant la scolarité, depuis la maternelle jusqu'à la fin du secondaire [50].
- Elaboration de normes ou standards dans l'enseignement des sciences [40].
- Développement d'un guide pour l'implémentation des standards [43].

Ces documents démontrent, comme souligné tout au long de ce rapport, que l'objectif essentiel dans l'enseignement des sciences n'est pas de faire accumuler par l'apprenant des connaissances sur un ensemble de faits et de théories. Il s'agit plutôt de lui faire progressivement assimiler des idées importantes qui lui permettent de comprendre des événements et des phénomènes pertinents dans sa vie. Les grandes idées sur et à propos des sciences proposées par le NRC sont résumés ci-après [30, p. 21 - 23] :

- La science suppose que chaque effet a une ou plusieurs causes ;
- Les explications et les modèles scientifiques sont ceux qui justifient au mieux les faits connus à un moment précis ;
- Les connaissances produites par la science sont utilisées par les techniques pour créer des produits qui répondent aux besoins des hommes ;
- Les applications des sciences ont des implications éthiques, sociales, économiques et politiques ;
- Tous les matériaux de l'univers sont faits de particules fondamentales ;
- Les objets peuvent affecter d'autres objets à distance ;
- Changer le mouvement d'un objet requière que des forces lui soient appliquées ;

- La quantité d'énergie dans l'univers est invariante, mais l'énergie peut être transformée quand les choses changent ou sont entraînés de changer ;
- La composition de la terre et de son atmosphère et les processus qui s'y produisent façonnent la surface de la terre et son climat ;
- Le système solaire est une partie infime des milliards de galaxies qui constituent l'univers ;
- Les organismes vivants sont organisés autour d'une base cellulaire ;
- Les organismes ont besoin d'une source d'énergie et de matériaux dont ils sont toujours dépendants, en compétition avec d'autres organismes ;
- L'information génétique est transmise d'une génération d'organismes à la suivante ;
- La diversité des organismes, vivants et disparus, est le résultat de l'évolution.

Précisons dans la suite de cette annexe comment ces grandes idées sont détaillées pour l'enseignement des sciences du vivant.

A.2 Concepts de base des sciences du vivant

Les sciences du vivant couvrent un large spectre allant de l'étude des molécules, des organismes et des écosystèmes, à l'étude de la biosphère entière constituant la vie sur terre. Elles s'intéressent à des événements qui se produisent sur des échelles de temps allant d'un battement de cils à des millions d'années. Des avancées dans les sciences du vivant ont permis d'apporter des solutions biologiques à des problèmes sociétaux tels la sécurité alimentaire, l'énergie, la santé, et l'environnement.

Les systèmes vivants sont interconnectés et interagissent entre eux. Un principe fondateur des sciences du vivant réside dans le fait que tous les organismes sont reliés à travers l'évolution et que les processus de l'évolution ont abouti à la diversité extraordinaire de la biosphère. Il y a une diversité au sein et entre les espèces. Ce qui est valable pour la fonction d'un gène, d'une cellule, ou d'un organisme donné, est aussi valable pour d'autres organismes du fait de leurs interactions écologiques et de leurs relations phylogéniques (liens de filiation de l'évolution). L'évolution et ses mécanismes génétiques sous-jacents d'hérédité et de variabilité sont essentielles pour la compréhension de l'unité et de la diversité de la vie.

Les sciences du vivant se focalisent sur les modèles, les processus et les relations entre les organismes. Les spécialistes utilisent les observations, expériences, modèles et calculs pour explorer comment le monde vivant fonctionne. Quatre groupes de concepts principaux sont proposés par l'IAP pour traduire les principes unificateurs des sciences du vivant (cf. [Figure 19](#)). Ses propositions s'appuient sur plusieurs études et se prolongent en diverses mises en œuvre pédagogiques opérationnelles, dont, en particulier, celles des référé-

rences suivantes : [4, 12, 35, 40, 41, 42, 60]. L'enseignement de chacun des concepts de base est détaillé aux divers niveaux de la scolarité.

- *Des molécules aux organismes : Structures et Processus*
 - Structure et fonction
 - Croissance et développement des organismes
 - Organisation des flux de matière et d'énergie dans les organismes
 - Traitement de l'information
- *Ecosystèmes : Interactions, énergie, et dynamique*
 - Interdépendance des relations dans les écosystèmes
 - Cycles de transfert de la matière et de l'énergie dans les écosystèmes
 - Dynamique, fonctionnement et résilience d'un écosystème
 - Interactions sociales et comportement de groupe
- *Phénotypes : transmission héréditaire et variation des caractères spécifiques*
 - Transmission héréditaire des caractères spécifiques
 - Variation des caractères spécifiques
- *Evolution biologique : unité et diversité*
 - Evidences d'un ancêtre commun et diversité
 - Sélection naturelle
 - Adaptation
 - Biodiversité et l'Homme

FIGURE 19 – Principaux concepts en sciences du vivant, selon [50, p. 141].

A titre illustratif, précisons comment les concepts autour de l'évolution biologique sont détaillés. L'enseignement sur ce point aborde en particulier les questions suivantes : (i) Comment peut-on expliquer autant de similarités entre des organismes si différents tels que les plantes, les animaux et les micro-organismes ? et (ii) comment la biodiversité affecte l'espèce humaine ?

L'évolution biologique explique l'unité et la diversité des espèces et fournit le principe unificateur pour comprendre l'histoire et la diversité de la vie sur terre. L'évolution est un phénomène continu qui se produit lorsqu'une mutation naturelle entraîne une variation génétique d'une population et change par sélection la distribution des traits dans cette population de façon graduelle à travers plusieurs générations. L'évolution peut se produire rapidement en cas de changements brutaux des conditions environnementales, aboutissant parfois à l'extinction d'espèces. Au cours de l'évolution, ce sont les traits génétiques en mesure de faire face aux défis environnants qui sont transmis d'une génération à une autre. Après plusieurs générations, ce processus peut aboutir à l'émergence de nouvelles espèces. C'est grâce à ce processus que l'évolution explique aussi bien la similarité du matériel génétique entre les espèces que la multitude d'espèces existantes dans différentes conditions sur terre (biodiversité) dont dépend l'Homme pour ses ressources naturelles et les conditions de sa survie. Analysons les quatre notions que l'IAP propose de développer pour l'enseignement de l'évolution.

Evidence d'un ancêtre commun et diversité des êtres vivants. La question posée ici est : *Quelle est la preuve de la parenté entre les différentes espèces ?*

La preuve de la parenté ancestrale entre organismes et espèces peut être retrouvée dans les archives de fossiles à travers l'anatomie et l'embryologie comparatives, la similitude des structures et des processus cellulaires, et la comparaison des séquences d'ADN des différents organismes et espèces. Ces éléments doivent être présentés aux apprenants à différents niveaux scolaires sous diverses formes, avec des supports et méthodologies appropriées à leur niveau de connaissance (cf. Figure 20).

Quelles preuves démontrent que différentes espèces sont liées ?

- (2^e année). Des espèces de plantes et d'animaux qui vivaient autrefois sur terre (par exemple, les dinosaures) n'existent plus, bien que d'autres espèces vivantes (par exemple, les lézards) leur ressemblent d'une certaine manière.
- (5^e année). Les fossiles fournissent des preuves sur les types d'organismes (visibles et microscopiques) qui ont vécu longtemps et aussi sur la nature de leur environnement. Les fossiles peuvent être comparés les uns aux autres et aux organismes vivants selon leurs similitudes et leurs différences.
- (8^e année). Les fossiles sont des remplacements minéraux, des restes conservés ou des traces d'organismes qui vivaient dans le passé. Des milliers de couches de roches sédimentaires témoignent non seulement de l'histoire de la terre elle-même, mais aussi des changements dans les organismes dont les restes fossiles ont été trouvés dans ces couches. La collecte des fossiles et leur placement dans un ordre chronologique (par exemple, par l'emplacement des couches sédimentaires dans lesquelles ils se trouvent ou à travers une datation radioactive) documente l'existence, la diversité, l'extinction et le changement de nombreuses formes de vie tout au long de l'histoire de la vie sur terre. En raison des conditions nécessaires à leur conservation, divers types d'organismes qui existaient dans le passé ont laissé des fossiles qui peuvent être retrouvés. Les similitudes anatomiques et les différences entre des organismes vivants aujourd'hui et des organismes dans l'enregistrement fossile permettent la reconstruction de l'histoire évolutive et l'inférence des lignes de descendance évolutive. La comparaison du développement embryologique de différentes espèces révèle également des similitudes qui montrent des relations non évidentes dans l'anatomie complètement formée.
- (12^e année). L'information génétique fournit également des preuves de l'évolution. Les séquences d'ADN varient selon les espèces, mais il existe de nombreux recouvrements ; en fait, la branche en cours qui produit de multiples lignes de descendance peut être déduite en comparant les séquences d'ADN de différents organismes. De telles informations sont également dérivables des similitudes et des différences dans les séquences d'acides aminés et des preuves anatomiques et embryologiques.

FIGURE 20 – *Preuves de l'ascendance commune et diversité, selon [50, p.162]*

La sélection naturelle. La question posée ici est : *comment les variations génétiques entre organismes affectent-elles la survie et la reproduction ?*

Les variations génétiques entre espèces se traduisent chez les individus par un ensemble de traits plus à même que d'autres d'assurer l'adaptation à l'environnement, la survie et la reproduction de l'espèce : c'est ce qu'on appelle la sélection naturelle. Cette dernière va aboutir à la prédominance et à la suppression de certains traits héréditaires (ou phénotypes) dans une population. La sélection naturelle se produit si la variation de l'information génétique au sein d'une population est exprimée en traits qui diffèrent entre les individus en termes de survie et de capacité à se reproduire dans des conditions environnementales spécifiques (cf. [50, p.163]).

L'adaptation. La question posée ici est : *comment l'environnement influence-t-il une population d'organismes à travers les générations ?*

La modification de l'environnement peut s'accompagner de changements conséquents en ressources et de défis biologiques ou physiques pour les organismes qui y vivent. Certains individus dans une population ont des traits morphologiques, physiologiques ou comportementaux qui leur donnent un avantage reproductif par rapport à d'autres au regard des changements environnementaux subis. La sélection naturelle fournit aux espèces les mécanismes pour s'adapter aux changements de leur environnement. Les pressions de sélection qui en résultent influencent la survie et la reproduction des organismes à travers les générations et peuvent changer la distribution des traits dans une population. Ce processus est appelé adaptation (cf. [50, p.164]).

La biodiversité et les humains La question posée ici est : *qu'est-ce que la biodiversité ? quelle influence a-t-elle sur les humains et réciproquement, comment l'Homme influence la biodiversité ?*

Les êtres humains font partie et dépendent du monde naturel. La biodiversité – la multitude de gènes, d'espèces et d'écosystèmes – fournit à l'homme des ressources renouvelables en aliments, plantes médicinales, eau, etc. Les humains bénéficient également de ce qu'on appelle des "services d'écosystèmes" tels que la stabilisation du climat, la décomposition des déchets ou la pollinisation, qui sont fournis par des écosystèmes en "bonne santé", c'est à dire variés et résistants.

L'utilisation des communautés de ressources biologiques a ses limites. En effet, dans plusieurs cas, les humains par leur pratiques – surexploitation des ressources naturelles, destruction d'habitats par déforestation, introduction d'espèces invasives, pollution de l'air et de l'eau, changement climatique, etc – menacent la santé des écosystèmes et sa durabilité, aboutissant parfois à sa dégradation, à l'extinction d'espèces et à la perte des services fournis par leurs écosystèmes (cf. [50, p. 166]).

A.3 Des concepts leur mise en œuvre pédagogique

La réforme de l'enseignement des sciences du vivant au Maroc devra nécessairement traduire les concepts de base retenus pour cet enseignement en recommandations précises pour leur mise en œuvre sur le plan pédagogique. Ainsi, pour l'exemple des USA dont s'inspire cette annexe, ces recommandations se sont traduites par :

- des normes ou standard du contenu de l'enseignement [40]; et
- un guide d'implémentation de ces normes [43].

Les normes ne constituent pas des curriculum en tant que tels. Ils tracent des objectifs qui reflètent les compétences qu'un apprenant doit acquérir, ce qu'il doit être en mesure de faire pour démontrer une bonne maîtrise du domaine. Ils sont destinés aux enseignants et aux développeurs de curriculum. Ils ne dictent pas la manière ou les méthodes avec lesquelles les idées principales seront enseignées, laissant ces choix libres aux établissements et aux enseignants, à adapter aux contextes.

Le caractère innovant de ces normes réside dans l'intégration de chaque concept ou question à étudier, aux pratiques scientifiques à mettre en œuvre et aux principes transverses à acquérir. Par ailleurs, ces normes mettent l'accent sur les objectifs à atteindre en termes de compétences de l'apprenant, laissant toute latitude et flexibilité à l'enseignant, au développeur de curriculum, et aux autres intervenants pour déterminer la meilleure manière d'accompagner l'apprenant pour atteindre ces compétences.

Le guide d'implémentation des normes [43] explicite des règles et priorités qui doivent être adoptées localement au niveau des régions et des établissements. Les éléments soulignés portent en particulier sur la cohérence entre cycles d'étude et les mécanismes d'évaluation. Un effort spécifique est recommandé pour s'assurer que la communication vers les apprenants, leurs familles et la société soit permanente et pertinente. Enfin, l'équité de l'enseignement doit constituer un objectif prioritaire.

A.4 Conclusion

L'éducation des sciences du vivant au Maroc doit bien entendu prendre en compte les spécificités du pays, tout autant que les impératifs et caractères universelles des sciences et de leur enseignement. A côté de plusieurs exemples de réformes récentes dans le monde, celui des USA, illustré dans cette annexe, est relativement instructif. Il propose un cadre intégratif, depuis l'énoncé des principes et des grands concepts, jusqu'au développement des objectifs, des normes, de leur mise en œuvre pédagogique et de l'évaluation des acquis, en tenant compte de l'environnement éducatif et du rôle des éducateurs. Il s'appuie sur quelques fondements généraux, au-delà des seules sciences du vivant, que nous proposons de prendre en compte pour la définition de la réforme au Maroc, parmi lesquels :

- L'énoncé d'une vision intégrant le principe d'équité.
- L'énoncé de principes clairs pour l'éducation des sciences.
- L'identification des concepts ou grandes idées en sciences et au sujet des sciences
- L'adoption des trois dimensions pour l'enseignement des sciences à savoir : *(i)* la dimension pratique ou expérimentale en science et ingénierie, *(ii)* la dimension spécifique à chaque champ disciplinaire à travers les idées principales par champ et *(iii)* les concepts transversaux qui transcendent les disciplines.
- L'élaboration de normes, dans leur déclinaison sur ces trois dimensions, avec la définition des objectifs et des compétences associées.
- L'adoption d'une pédagogie active, basée sur le questionnement (Inquiry Based Science Education) et l'évaluation formative.
- La prise en compte de l'environnement de l'apprentissage, centré sur l'apprenant, sur l'acquisition des compétences, sur l'évaluation, et sur la promotion du sens communautaire, pour les aligner avec les objectifs pédagogiques.
- La révision des curricula pour la formation de base et la formation continue des enseignants ainsi que pour leur développement professionnel, avec prise en compte des compétences scientifiques mais aussi pédagogiques : comment l'élève assimile les concepts et pratiques scientifiques en fonction de son stade de développement ; quelles méthodes et techniques nécessaires à l'apprentissage des sciences.
- Placer la maîtrise des sciences (science proficiency) comme préoccupation centrale pour le développement des curricula des apprenants et des enseignants, en vue de former des jeunes capables de contribuer à la société en tant que citoyens éduqués et responsables.
- L'élaboration d'une stratégie de communication autour de la nouvelle vision et de ses objectifs, avec des supports et contenus appropriés à chaque type d'audience.
- Le développement de partenariats et de réseaux autour de l'éducation des sciences.
- La promotion et l'appui à une recherche structurée dans ce domaine pour mieux informer les politiques et réorienter l'action.

B Mathématiques et statistique

Tout au long des cursus de formation, les mathématiques doivent constituer la matière basique qui permet de faciliter la compréhension des autres disciplines. Cette discipline doit toujours permettre l'indispensable acquisition de mécanismes mathématiques. Elle doit être associée à une intelligence de leur signification pour l'enfant et à leur lien avec le concret et elle doit aussi montrer le rôle de l'imagination aux côtés de la rigueur.

Au-delà de la rigueur et des programmes, un véritable effort de formation continue des enseignants (qui est la composante essentielle de toute amélioration de l'école, comme le montrent des expériences telles que *La main à la pâte* ou encore *Maths-en-Jeans*, et de nombreuses observations internationales) doit être mis en œuvre. Il faut aussi un leadership pédagogique des directions d'écoles.

Même si l'école primaire demeure centrée sur le développement de l'ensemble des potentialités de l'enfant, tout projet pédagogique en mathématiques doit harmonieusement concourir toutes les disciplines, grâce à la synergie des apprentissages permise par la polyvalence du maître unique, sans alourdissement excessif de contenus et avec une information adéquate pour les familles. Mais il faut montrer et permettre aux élèves de croiser les disciplines et les regards ; ceci constitue un enjeu majeur pour les enseignants. Pour autant, intégrer la question de l'interdisciplinarité dans la pratique ordinaire n'est pas chose facile. Aujourd'hui les mathématiques ne constituent pas une citadelle fermée, mais interagissent et servent dans de nombreux secteurs socio-économiques tels que l'énergie, la santé, l'économie ou l'environnement. Par conséquent l'enseignant doit proposer des pistes, des réflexions et des analyses l'amenant à faire interagir les mathématiques avec d'autres disciplines.

L'exemple du système éducatif québécois, et du projet de Sciences et mathématiques en action (SMAC [65]) illustre des initiatives très enrichissantes et pourrait servir de base de réflexion sur la façon d'enseigner autrement les mathématiques aussi bien au niveau primaire qu'au secondaire. C'est l'œuvre d'une équipe formée de professeurs-chercheurs, d'enseignants et d'étudiants en mathématiques, en informatique et en didactique. Le projet est basé essentiellement sur l'apprentissage par le plaisir et par le jeu. Lancé en 2005, le projet SMAC "*a pour mission d'éveiller et de renforcer chez les jeunes l'intérêt pour les mathématiques et les sciences tout en démystifiant les mathématiques auprès de la population en général*". Dans cette perspective, l'équipe SMAC a dirigé deux initiatives : *Show Math* [65] et *MathAmaze* [80].

Le premier projet, *Show Math*, est un spectacle multimédia, conçu pour les élèves du secondaire, qui offre un moyen divertissant de rendre les mathématiques accessibles, avec des vidéos et des croquis de bande dessinée, et de découvrir leur rôle dans notre vie quotidienne. Comme il est essentiel de

sensibiliser les jeunes aux sciences et aux mathématiques le plus rapidement possible [61], une version a été conçue pour les élèves du primaire Petit Show Math. Ce sont donc des spectacles multimédias animés par l'équipe de professeurs et d'étudiants en classe et accompagnés de troupes d'accompagnement pour l'enseignant et pour l'élève.

Pour le Petit Show Math, il existe trois documents concernant, l'histoire des nombres, le son et l'espace. À titre d'illustration, le document concernant les nombres commence par faire l'histoire des nombres de la préhistoire, quand l'Homme a commencé à compter, jusqu'au monde arabe pour introduire la notion de "calcul" et les différentes façons d'écrire les chiffres et les nombres, à travers la civilisation. Il est, certes, important d'apprendre les opérations de base au primaire (addition, soustraction, multiplication et division). Le rôle de l'enseignant est primordial pour introduire et expliquer les opérations de base aux élèves. Cependant, le problème est qu'elles sont souvent apprises par cœur et ne sont pas mises en lien avec des situations de la vie quotidienne afin de leur donner une signification concrète aux yeux des apprenants. On se rappelle toutes et tous de la récitation de la table de multiplication toute la classe en chœur, mais que représente la multiplication dans la vie courante ? Petit Show Math propose, par exemple, d'illustrer l'addition, la soustraction, la multiplication et la division par une activité qui mesure la distance parcourue entre deux villes par deux personnes différentes ou encore en proposant un jeu de cartes à un groupe d'élèves avec l'utilisation de la calculatrice et d'un chronomètre.

Pour Show Math, initiative dédiée aux élèves du secondaire, on peut illustrer des concepts mathématiques tels les proportions, les propriétés des exposants, les fonctions logarithmes et exponentielles, les équations et inéquations, le théorème de Pythagore, les probabilités (fréquentielles et théoriques) et la statistique (tirage avec ou sans remise), la cryptographie avec codage et décodage, etc., sous forme d'activités utilisant des outils de base (ciseaux, règles, etc.) mais, aussi, lorsque c'est disponible, un ordinateur pour simuler et illustrer graphiquement certains concepts.

Le fondateur de SMAC, Jean-Marie De Koninck, donne des illustrations de concepts mathématiques en théorie des nombres et en cryptographie [81]. L'idée de coder l'information pour qu'elle demeure confidentielle existe depuis au moins 2 000 ans, en particulier dans les communications militaires. Au cours de la deuxième guerre mondiale, Alan Turing a réussi en 1941 à décoder les communications cryptées par la machine Enigma. Plus tard, Rivest, Shamir et Adleman ont eu l'idée d'utiliser les nombres premiers pour concevoir un algorithme de cryptographie efficace [52]. Cet algorithme est basé sur la complexité de factorisation en nombres premiers d'un nombre arbitraire très grand (200 chiffres), même avec un ordinateur très puissant. En effet, la multiplication est simple, mais on ne connaît de méthode rapide pour faire le processus inverse, c'est-à-dire décomposer un très grand nombre en les nombres dont il est le produit, ou prouver qu'il est

premier.

Le deuxième projet, MathAmaze [80], est un jeu Internet gratuit disponible en français et en anglais. L'objectif est d'accumuler autant de pièces que possible, en un temps limité, en répondant à des questions mathématiques. La banque de questions de MathAmaze comprend plus de 3000 questions. Le jeu est disponible pour tous les utilisateurs, de 6 à 99 ans ! MathAmaze peut également être utilisé par les enseignants pour proposer les devoirs aux élèves ; si un enseignant le demande à l'équipe SMAC, il peut isoler une catégorie de questions (par exemple, la géométrie) ou ajouter ses propres questions au jeu.

Pour toutes ces initiatives, les technologies numériques jouent un rôle important pour capter l'intention des jeunes, les motiver afin qu'ils persévèrent dans l'apprentissage des concepts mathématiques souvent abstraits et, par ricochet, contribuer à les relier à leur environnement immédiat.

À la lumière de ce qui précède, et afin de contribuer à répondre à la question "Vers quelles mathématiques ?", nous proposons une approche pédagogique basée sur un apprentissage des mathématiques qui justifie et ancre les concepts formels par des illustrations concrètes, issues de la vie quotidienne, par exemple sous forme de jeux. Cet apprentissage doit s'appuyer sur les méthodes et technologies numériques, telles que des vidéos multimédias, des logiciels interactifs, ou des simulations sur ordinateur. Ceci devra se faire dans un continuum du début de l'école primaire à la fin de l'école secondaire. L'enseignant et l'élève sont au cœur de cette action.

Finalement, pour illustrer l'interdisciplinarité et contribuer à démystifier davantage les mathématiques, la statistique pourrait être un excellent moyen d'y parvenir. Elle pourrait certainement être enseignée dès la première année du secondaire pour faire aussi bien du dénombrement, que de la prédiction et de l'estimation. De nombreux exemples, concrets et parfois ludiques, de corrélations statistiques permettraient d'introduire ces différentes notions et de susciter les échanges entre les élèves et leur enseignant (cf. Figure 21).

- *En Italie, on constate que les régions dans lesquelles les taux d'achat d'ordinateur personnels sont les plus importants sont également celles où les taux de divorce sont les plus élevés ;*
- *Une étude japonaise montre que ceux qui se brossent les dents après chaque repas parviennent mieux que les autres à garder la ligne ;*
- *Il existe une association positive entre utilisation de crème solaire et le cancer de la peau ;*
- *Le nombre de noyades est positivement associé à la consommation de crèmes glacées.*

FIGURE 21 – Quelques corrélations qui ne sont ni fortuites ni causales [10].

Dans le contexte de foisonnement de ressources numériques en mathématiques, notamment grâce à internet, la question de qualité des ressources disponibles se pose de manière insistante. Il ne faut pas négliger les critères de qualité des ressources numériques pour l'enseignement (validité épistémologique, qualité technique, didactique, accessibilité, transférabilité, pérennité, etc.). Ceci peut donner éventuellement lieu à un cahier des charges de conception et d'usage de celles-ci. Le numérique à l'école primaire permet d'engager les élèves dans une réelle activité mathématique, sur la base d'une manipulation directe de représentations d'objets mathématiques à l'interface du terminal numérique.

Ceci conduit à une refonte importante, complète et inévitable aujourd'hui, pour un enseignement qui mette les jeunes Marocains au concert des élèves de toutes nations, et qui leur permette de mieux préparer leur avenir au travers de tous les débouchés possibles. Cette refonte se traduit, comme cela a été mentionné par ailleurs, par :

- une alphabétisation numérique qui doit venir compléter les autres outils de transmission et de compréhension des savoirs. Elle est plus facile à adapter aux mathématiques,
- une pédagogie, s'appuyant sur cette alphabétisation, de type pédagogie de l'atelier. Cette pédagogie reviendrait au fondement historique de la pédagogie et selon lequel l'enseignant et l'élève font l'enseignement ! En mathématiques et avec leur interdisciplinarité rappelée plus haut, ceci peut être opéré de façon plus aisée.

C Sciences numériques

C.1 Introduction

Le terme “*numérique*” fait référence à l’ensemble des instruments et modalités computationnels associés à l’information, à la communication et aux prolongements sensoriels et cognitifs humains. Il apporte, pour ces notions essentielles, une transformation analogue à celle de l’écriture, qui marque le passage de la préhistoire à l’histoire. Le numérique constitue potentiellement une rupture équivalente dans l’évolution de l’humanité.

Relativement aux préoccupations du GRES sur l’enseignement des STEM, le numérique est un élément déterminant qui doit être appréhendé aux trois niveaux suivants :

- Un ensemble d’outils matériels et de savoir-faire pratiques dont la maîtrise est désormais essentielle pour pouvoir s’informer, s’exprimer et raisonner ;
- Un corpus de notions abstraites, de compétences cognitives et méthodologiques qui sont au cœur des sciences et de l’ingénierie numériques ;
- Un ensemble de méthodes pédagogiques qui démultiplient et prolongent l’école grâce aux possibilités d’adaptation et d’interaction du numérique.

La reste de cette annexe développe ces deux derniers points sur les *sciences numériques* et la *pédagogie numérique*.

La question de l’infrastructure matérielle (choix des réseaux, ordinateurs, interfaces) supportant l’enseignement numérique ne sera pas abordée en tant que telle. Cette infrastructure constitue rarement l’élément bloquant dans l’effort de développement de cet enseignement. Cependant, une recommandation sur ce point s’impose : *réduire autant que possible l’usage des systèmes propriétaires fermés* (matériels, logiciels, supports pédagogiques), et privilégier très largement le déploiement de *systèmes ouverts à accès libre*. Cette recommandation résulte d’une exigence pédagogique. Elle est également une condition nécessaire de maturation et d’indépendance. Enfin, elle peut être mise à profit dans le cadre de nombreux réseaux et communautés d’échanges pédagogiques particulièrement dynamiques.

C.2 Sciences numériques

Les *sciences numériques* font référence à un ensemble de méthodes et d’outils, conceptuels et matériels, permettant d’appréhender des problèmes complexes sous toutes leurs facettes, par l’observation, l’expérimentation, la modélisation, le calcul et la simulation à grande échelle. Elles s’appuient sur l’intégration de trois composantes essentielles :

- Des modèles mathématiques, multiples et hétérogènes (continus, discret, déterministes, stochastiques), et des méthodes de calcul intensif et de simulation à haute performance ;

- Des techniques d'instrumentation, de mesure et d'imagerie exploitant des réseaux de capteurs pour la collecte de signaux et l'observation ;
- Des méthodes de traitement, de conservation et de visualisation de données issues des mesures et/ou des calculs ; des algorithmes d'indexation, de fouilles de données, de fusion et d'apprentissage automatique qui permettent d'extraire des signaux observés des relations significatives et de nouvelles connaissances.

Les sciences numériques imprègnent l'ensemble des STEM. Elles sont développées par toutes leurs disciplines. Grace aux possibilités d'intégration de modèles et de données, multiples et hétérogènes, elles sont à la base d'une interdisciplinarité fructueuse, qui dépasse les cloisonnements académiques et permet d'aborder les couplages inhérents aux approches réalistes des problèmes de la nature et de la société.

Les sciences numériques sont donc transverses à l'ensemble des STEM. Elles vont des mathématiques pour ce qui est des modèles et méthodes de calcul, à l'ingénierie pour ce qui est de l'instrumentation, en passant par les sciences de la matière, de la terre et de la vie. Cette section ne développe donc que ce qui est propre aux concepts et méthodes du numérique et qui nécessite un enseignement spécifique.

Les concepts et méthodes spécifiques au numérique se concrétisent en des approches nouvelles de représentation des connaissances, de formulation et de résolution de problèmes. Ces approches (qualifiées de "*computational thinking*" par Wing [82]) conjuguent, de façon opérationnelle, les démarches de la logique formelle, des mathématiques et de l'ingénierie. Elle permettent d'appréhender quantitativement des notions essentielles telles que la calculabilité, la complexité, l'observabilité, la stabilité, ou la contrôlabilité d'un système. Nous parcourons rapidement dans ce qui suit les principales notions autour des *données*, des *algorithmes*, des *signaux*, des *raisonnements* et de quelques *fonctionnalités numériques*, avant d'aborder les questions de périmètre (*qui*) et de méthode (*comment*).

Données. L'enseignement de ces concepts et méthodes spécifiques au numérique doit viser à faire acquérir des compétences de base en *structure et organisation des symboles, des données et des procédures*. Il s'agit de familiariser l'élève à divers niveaux, de l'intuition première aux détails mathématiques, avec des notions telles que, par exemple :

- Les relations, leurs compositions et projections ;
- Les graphes, arbres et forêts ;
- Les ontologies, les classes, les hiérarchies et les héritages d'attributs ;
- Les expressions régulières et les grammaires formelles ;
- Les automates et machines abstraites ;

- Les méthodes d'indexation, d'indirection, d'unification ;
- La récursivité des processus et des structures.

Algorithmes. *L'algorithmique* est au cœur de cet enseignement. Son apprentissage, illustré sur des données concrètes et des algorithmes classiques, devra conduire l'élève à comprendre et à se familiariser avec des concepts de base, dont les suivants :

- Les procédures, les notions d'invariants, de point fixe, de terminaison et de non déterminisme ;
- La complétude et correction des procédures, et les questions de décidabilité ;
- La concurrence, le parallélisme et la distribution des procédures ;
- Les classes de complexité algorithmique ;
- L'abstraction, la décomposition, la réduction et la hiérarchisation de problèmes ;
- Les espaces de recherche de résolution de problèmes ;
- Les stratégies d'exploration, systématiques ou guidées par heuristiques, de ces espaces ;
- Les méthodes de résolution par échantillonnage probabiliste ;
- Les classes d'approximation, en qualité et/ou en probabilité, les algorithmes à approximation garantie et/ou interruptibles ("anytime algorithms").

Signaux. Les composantes liées à l'instrumentation et à l'ingénierie spécifiques au numérique relèvent des théories de *l'information, du signal et des systèmes dynamiques*. L'enseignement (secondaire) devra introduire des notions de base telles que par exemple :

- Les canaux de transmission, le bruit et l'entropie ;
- Le codage, la compression, l'encryption de données ;
- L'estimation et le filtrage ;
- La contre-réaction, la régulation, l'asservissement et la commande.

Raisonnements. Apprendre à *raisonner* est l'un des trois fondamentaux de l'école que nous proposons. Son apprentissage passe par une pratique quotidienne, dans l'ensemble des disciplines de l'école, qui invite l'élève à réfléchir, à confronter sa démarche argumentaire à celle de ses camarades, à identifier les raisonnements incorrects et leurs vices. Cet apprentissage passe également (au secondaire) par une compréhension des bases de la *logique* et une familiarisation avec quelques concepts clés de l'argumentaire rationnel,

de ses limitations et hypothèses. Il s'agit par exemple d'introduire des notions telles que :

- Le raisonnement par récurrence, linéaire ou arborescente ;
- Les figures classiques du raisonnement déductif, abductif et inductif ;
- Les notions d'axiomatique et de modèles d'interprétation de formules logiques, de preuve (syntaxique) et de conséquence logique (sémantique), les logiques saines, complètes, et décidables.

Des logiques élémentaires (propositions et prédicats) peuvent servir à traiter des puzzles ludiques et des problèmes simples. Des logiques plus élaborées (e.g., modales, épistémiques, déontiques, temporelles) peuvent permettre d'introduire la formalisation de problèmes ou documents plus complexes (juridiques, historiques). Enfin, les notions de procédure automatique de preuve et de mécanisation du raisonnement peuvent être abordées en particulier par l'usage de logiciels et moteurs d'inférence (e.g., SAT, ASP).

Fonctionnalités numériques. Divers approfondissements peuvent être présentés pour illustrer les techniques et méthodes précédentes par quelques grandes classes de fonctionnalités numériques, largement répandues dans toutes les STEM et, dorénavant, dans des applications grand-public, par exemple :

- Le design graphique, la synthèse d'images, la conception (mécanique, architecturale, urbaine) et la réalisation numérique (imprimantes 3D) ;
- La simulation et la visualisation de systèmes dynamiques (des mouvements et interactions de particules et objets simples, aux jeux vidéo et mouvements de foules) ;
- La conception sûre, la redondance, la fiabilité, la détection de fautes et le diagnostic automatiques ;
- La catégorisation et la reconnaissance des formes ;
- L'apprentissage statistique et logique, supervisé ou par renforcement ;
- La planification, l'ordonnement et la synthèse automatique de politiques et de programmes ;
- L'analyse, la transcription écrite, la synthèse, le résumé ou la traduction automatiques de documents en langages naturels.

Bien entendu, la maîtrise de l'ensemble des théories et techniques sous-jacentes aux fonctionnalités précédentes relève d'une spécialisation académique. Cependant, l'usage de ces fonctionnalités est de plus en plus répandu (e.g., Google Translate, Goggles ou Bing visual search engines, etc.). Il est important donc d'en comprendre dès le lycée les principes et limitations.

Qui. Nous avons souligné que l'alphabétisation numérique concerne tous les élèves, à tous les niveaux. Il est de même souhaitable qu'une introduc-

tion aux sciences numériques soit généralisée à tous les élèves dès la fin du primaire et développée pendant tout le premier cycle du secondaire, en particulier sur les notions touchant les données et les algorithmes. Au second cycle et dans le supérieur, les étudiants de toutes les filières scientifiques et techniques, sans exception, devront pouvoir acquérir des compétences substantielles sur l'ensemble des notions qui précèdent.

Comment. L'enseignement des sciences numériques *ne se réduit pas* à celui de la programmation des ordinateurs (erreur fréquente). Des compétences en génie logiciel ne sont d'ailleurs pas requises pour maîtriser les notions qui précèdent (c'est plutôt l'inverse qu'il faut respecter). Ces notions doivent être enseignées essentiellement sur la base de *pratiques* individuelles et collectives, d'essais et d'erreurs, en interaction avec des ordinateurs et des systèmes. L'alphabetisation numérique doit fournir une familiarisation initiale avec ces interactions. Les autres notions nécessaires de la programmation doivent être enseignées principalement en tant qu'illustrations et mises en œuvre des concepts de base développés plus haut, en particulier ceux relatifs aux données et algorithmes (à l'instar de l'ouvrage classique d'Abelson et al. [1]).

Une autre erreur à éviter est de cloisonner le numérique en une seule discipline, confiée par exemple à un seul enseignant d'informatique. Le numérique illustre particulièrement bien notre recommandation de réduire substantiellement les spécialisations disciplinaires des enseignants du secondaire. Nous préconisons ici une approche multidisciplinaire large. Les notions qui précèdent doivent pouvoir être intégrées dans une révision de l'enseignement de l'ensemble des STEM, des mathématiques aux sciences de la vie, en passant par les sciences de la matière et de l'ingénieur. Nous partons de l'hypothèse que l'enseignant en saura moins sur les détails techniques des sujets traités que (certains de) ses élèves qui auront consultés des ressources en ligne. Il leur apporte un encadrement méthodologique, un recul et une vision intégrative qui stimulent leur curiosité et leur créativité sur un champ de connaissances à la portée de tous et en forte croissance.

Enfin, insistons de nouveau sur un point essentiel : la pédagogie est à affiner en fonction de l'objectif non pas de l'acquisition de savoirs mais de l'acquisition de compétences sur des méthodes et des principes. Il s'agit de compétences principalement analytiques : comment aborder un problème, analyser sa formulation, la traduire en modèles formels et approches effectives de résolution, critiquer les approches testées, en expliciter les hypothèses et limitations. Le contrôle de l'acquisition de ces compétences devra nécessairement être fait à livres et ordinateurs ouverts, et éviter autant que possible les contrôles individuels pour privilégier les projets par équipes.

C.3 Pédagogie numérique

Cette courte section ne porte pas sur la pédagogie *du* numérique, mais sur le développement de méthodes pédagogiques, pour l'ensemble du pré-scolaire et des matières scolaires, qui exploitent les technologies numériques. Motivons notre propos.

L'écrit est désormais insuffisant, disions nous pour justifier et expliquer la proposition de trois nouveaux fondamentaux pour l'école. Il faut rappeler sur ce point que, lors de sa diffusion dans la cité, l'écrit (exploité par les sophistes) fut largement critiqué comme traduisant un savoir statique et inerte, peu favorable à l'esprit critique, par opposition à l'argumentaire oral et au dialogue.³² Désormais le document numérique peut parler, s'adapter, répondre, interagir avec, et être modifié par son interlocuteur, comme le souhaite Socrate. Le document qui interagit est un document qui forme.

La pédagogie numérique consiste en la mise en œuvre d'un ensemble de méthodes, de logiciels et d'interfaces permettant une adaptation relativement précise aux domaines et concepts à enseigner, ainsi qu'à l'élève et sa progression dans l'acquisition de ces concepts. Elle peut exploiter, alternativement ou conjointement, plusieurs méthodes pédagogiques. Elle est d'ores et déjà déployée dans plusieurs jeux et méthodes ludiques d'enseignement, par exemple des langues, de la géographie, de la géométrie, de la logique ou de l'informatique.

Ce domaine soulève des recherches très actives, autour des "*Intelligent tutoring systems*" (e.g., [45] ou les nombreuses références dans l'article correspondant de Wikipedia), du "*e-learning*" ou des "*Serious games*". A titre d'illustration, Gordon and Breazeal [28] décrivent comment un enfant de maternelle peut apprendre à lire et à enrichir son vocabulaire en "enseignant" lui même des histoires à une marionnette instrumentée; Bauer et al. [9] dans le projet "*The living book of anatomy*" permettent à un étudiant de comprendre comment ses mouvements devant une caméra (kinect) se traduisent au niveau squelettique, articulaire et musculaire dans sa propre anatomie (Figure 22).

En résumé, les méthodes de pédagogie numérique ouvrent des perspectives très fructueuses qu'il faudrait explorer par de nombreuses initiatives et actions complémentaires. Dans ce sens, nous recommandons d'encourager des travaux de recherche et de développement pluridisciplinaires sur les systèmes d"*intelligent tutoring*" et "*e-learning*", par exemple via des appels à des projets de R&D collaborative, des expériences de terrain, des adaptations et

32. Socrate, selon Platon [48], argumente ainsi : "Ce qu'il y a de terrible, c'est la ressemblance qu'entretient l'écriture avec la peinture. Les êtres qu'engendre la peinture se tiennent debout comme s'ils étaient vivants; mais qu'on les interroge ils restent figés et gardent le silence. De même pour le discours (écrit ...) : si on l'interroge pour comprendre, c'est une seule chose qu'il se contente de signifier, toujours la même (...). Il passe indifféremment auprès de ceux qui s'y connaissent comme auprès des autres : il ne sait pas quels sont ceux à qui il s'adresse. Que s'élève à son sujet des voix discordantes (...) et il est incapable de se défendre".

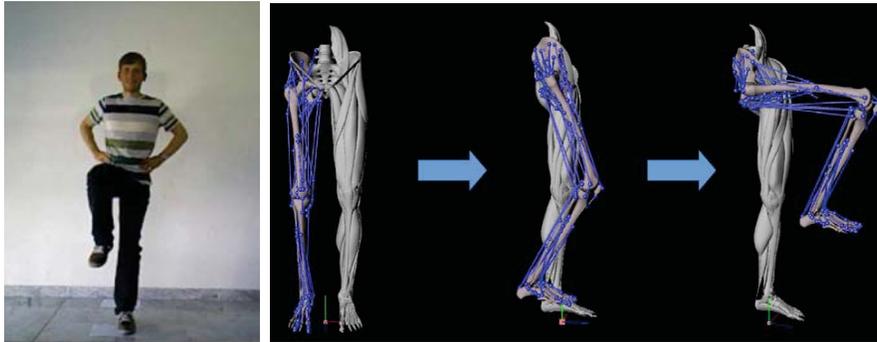


FIGURE 22 – Pédagogie numérique : boucle de détection–simulation–visualisation pour l'analyse anatomique des mouvements de l'étudiant devant sa camera, développée par le projet "The living book of anatomy" [9].

des déploiement de systèmes issus de la recherche.

Nous recommandons également :

- De diffuser largement des logiciels ludiques au sein de l'école ;
- De former les enseignants à l'usage des MOOC comme outils pédagogiques ;
- De maîtriser l'usage des licences d'accès libre, telles que par exemple les "Creative Commons" ;
- D'encourager des développements, des adaptations et des traductions de systèmes existants ;
- De lancer des expériences-pilotes pour l'intégration large de la pédagogie numérique aux cursus scolaire.

Enfin, il faut rappeler que l'immense majorité des matériaux pédagogiques, ou plus généralement relatifs au numérique, est en anglais. Il est nécessaire de développer l'enseignement de l'anglais, dès le primaire, pour et par les formations numériques.

Références

- [1] Abelson, H., Sussman, G. J., and Sussman, J. (1996). *Structure and interpretation of computer programs*. Justin Kelly.
- [2] Ackay, B. and Akcay, H. (2015). Effectiveness of science-technology-society instruction on student understanding of the nature of science and attitudes toward science. *International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology*, 3(1) :37-45.
- [3] Ajchenbaum-Boffety, B., Chevalerias, F., Chomat, A., Desbeaux-Salviat, B., Ernst, S., Jasmin, D., Larcher, C., Renoux, Y., Saltiel, E., and Sarmant, J.-P. (2009). La main à la pâte et le plan de rénovation de l'enseignement des sciences et de la technologie à l'école. http://lamap.bibalex.org/bdd_image/51_brochure_lamap.pdf.
- [4] American Association for the Advancement of Science and others, editor (1994). *Benchmarks for science literacy*. Oxford University Press.
- [5] Artigue, M., Dillon, J., Harlen, W., and Lana, P. (2012). Learning through inquiry. Resource document in the Fibonacci project : Designing, implementing, testing and formalising a process of dissemination in Europe of inquiry-based teaching and learning methods in science and mathematics in primary and secondary schools. <http://www.fibonacci-project.eu/>.
- [6] Bachelard, G. (1967). *La formation de l'esprit scientifique*. Editions Vrin.
- [7] Bachelard, G. (2002). *Etudes*. Editions Vrin.
- [8] Bacon, F. (1986). *Novum Organum*. Presses Universitaires de France.
- [9] Bauer, A., Paclet, F., Cahouet, V., Dicko, A., Palombi, O., Faure, F., and Troccaz, J. (2014). Interactive visualization of muscle activity during limb movements : Towards enhanced anatomy learning. In Viola, Buhler, and Ropinski, editors, *Proc. Eurographics Workshop on Visual Computing for Biology and Medicine*.
- [10] Bédard, J. (2012). Introduction aux probabilités et la statistique. <http://math.univ-lyon1.fr/~jberard/cours-www.pdf>.
- [11] Boston College and International Association for the Evaluation of Educational Achievement (2015). TIMSS international results report. <http://timss2015.org/>.
- [12] Brewer, C. A. and Smith, D. (2011). *Vision and change in undergraduate biology education : A call to action*. American Association for the Advancement of Science.

- [13] Charlesworth, R. (2015). *Math and science for young children*. Cengage Learning.
- [14] Charpak, G., Léna, P., and Quéré, Y. (2005). *L'enfant et la science, l'aventure de la main à la pâte*. O. Jacob.
- [15] Commission Européenne (2011). L'enseignement des sciences en Europe : politiques nationales, pratiques et recherche, réseau EURYDICE. http://eacea.ec.europa.eu/education/eurydice/documents/thematic_reports/133FR.pdf.
- [16] Conseil supérieur de l'éducation, de la formation et de la recherche scientifique (2015). Pour une école de l'équité, de la qualité et de la promotion : Vision stratégique de la réforme 2015 -2030. http://www.csefrs.ma/pdf/Vision_VF_Fr.pdf.
- [17] Dawkins, R. (1976). *The selfish gene*. Oxford University Press.
- [18] Dennett, D. C. (1990). Memes and the exploitation of imagination. *The Journal of Aesthetics and Art Criticism*, 48(2) :127–135.
- [19] Descartes, R. (1637). *Le discours de la méthode*. Classiques de Poche.
- [20] Deves, R. and Lopez, P. (2012). Inquiry based science education and its impact on school improvement : The ECBI Program in Chile. http://www.ecbichile.cl/wp-content/.../05/Handbook_Deves-7-041.pdf.
- [21] Dewey, J. (1933). *How we think : A restatement of the relation of reflective thinking to the educative process*. Heath.
- [22] Etkina, E. (2010). Design and reflection help students develop scientific abilities : Learning in introductory physics laboratories. *J. of the Learning Sciences*, 19(1) :54–98.
- [23] Freeman, S. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *PNAS*, 111(23) :8410–8415.
- [24] Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., and Wenderoth, M. P. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *PNAS*, 111(23) :8410–8415.
- [25] Gago, J. M. (2004). Europe needs more scientists : Report by the high level group on increasing human resources for science and technology. Technical report, European Commission, Brussels.
- [26] Gardner, M. (1971). *Mathematical Games from "Scientific American"*. WH Freeman.

- [27] Giedd, J. N. (2015). The amazing teen brain. *Scientific American*, pages 32–37.
- [28] Gordon, G. and Breazeal, C. (2015). Bayesian active learning-based robot tutor for children's word-reading skills. In *Proc. AAAI Conference on Artificial Intelligence*, pages 1343–1349.
- [29] Guichard, J. and Simonin, G. (2010). *La science ? Un plaisir !* Les éditions Ovidia.
- [30] Harlen, W., editor (2010). *Principles and big ideas of science education*. Association for Science Education.
- [31] Harlen, W., editor (2013). *Evaluation et pédagogie d'investigation dans l'enseignement scientifique : De la politique à la pratique*. IAP.
- [32] Harlen, W., editor (2015). *Working with Big Ideas of Science Education*. Science Education Programme, IAP.
- [33] Holdren, J., Marrett, C., and Suresh, S. (2013). Federal science, technology, engineering, and mathematics (STEM) education 5-year strategic plan. *National Science and Technology Council : Committee on STEM Education*.
- [34] Horton Jr, F. W. (1983). Information literacy vs. computer literacy. *Bulletin of the American Society for Information Science*, 9(4) :14–16.
- [35] Institute for Education Sciences (2015). Trends in International Mathematics and Science Study (TIMSS). <https://nces.ed.gov/timss/>.
- [36] Liao, L. and Pope, J. W. (2008). Computer literacy for everyone. *Journal of Computing Sciences in Colleges*, 23(6) :231–238.
- [37] Lubben, F., Bennett, J., Hogarth, S., and Robinson, A. (2005). A systematic review of the effects of context based and science-technology-society approaches in the teaching of secondary science on boys and girls, and on lower ability pupils. Institute of education, University of London.
- [38] Mitra, S. (2005). Self organising systems for mass computer literacy : Findings from the 'hole in the wall' experiments. *International Journal of Development Issues*, 4(1) :71–81.
- [39] Montaigne, M. (1969). *Les Essais*. Flammarion, Livre 1, Chap. 26, De l'institution des enfants.
- [40] National Research Council and NGSS Lead States, editor (2013). *Next generation science standards : For states, by states*. National Academies Press.

- [41] National Research Council and others, editor (2008). *The role of theory in advancing 21st-century biology : catalyzing transformative research*. National Academies Press.
- [42] National Research Council and others, editor (2009). *A new biology for the 21st century*. National Academies Press.
- [43] National Research Council and others, editor (2015). *Guide to implementing the next generation science standards*. National Academies Press.
- [44] National Science Foundation, editor (1997). *The Challenge and Promise of K-8 Science Education Reform. Foundations 1*. National Academies Press.
- [45] Nkambou, R., Mizoguchi, R., and Bourdeau, J. (2010). *Advances in intelligent tutoring systems*, volume 308. Springer.
- [46] OCDE, editor (2016). *Résultats du PISA (Volume I) : L'excellence et l'équité dans l'éducation*. OECDiLibrary.
- [47] Piaget, J. (1929). *The Child's Conception of the World*. Harcourt Brace.
- [48] Platon (1970). *Phèdre*. Oeuvres complètes, Bibliothèque de la Pléiade, Gallimard.
- [49] Popper, K. A. (1959). *The Logic of Scientific Discovery*. Hutchinson.
- [50] Quinn, H., Schweingruber, H., Keller, T., et al. (2012). *A framework for K-12 science education : Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. National Academies Press.
- [51] Rabelais, F. (1532). *Pantagruel (chapitre 8)*. Classiques de Poche.
- [52] Rivest, R. L., Shamir, A., and Adleman, L. (1978). A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems. *Communications of the ACM*, 21(2) :120–126.
- [53] Rocard, M. (2007). Science Education NOW : A Renewed Pedagogy for the Future of Europe. Technical report, European Commission.
- [54] Roland, J. M. (2006). Rapport d'information sur l'enseignement des disciplines scientifiques dans le primaire et le secondaire. Technical report, Assemblée nationale, Paris.
- [55] Science Education Hub Radboud University (2017). Scientific breakthroughs in the classroom. www.wkru.nl.
- [56] Selber, S. (2004). *Multi-literacies for a digital age*. SIU Press.

- [57] Sjoberg, S. (2016). "oecd, pisa" and globalisation : the influence of the international assessment regime. In Tienken, C. H. and Mullen, C. A., editors, *Education Policy Perils*. Routledge.
- [58] Sjoberg, S. (2017). "pisa testing : A global educational race. *Europhysics News*, 48(4) :17–20.
- [59] Smithsonian Science Education Center (2015). The laser model : A systemic and sustainable approach for achieving high standards in science education. <https://ssec.si.edu/laser-i3>.
- [60] The College Board of New York (2009). Science : College board standards for college success.
- [61] The Editors (2010). Start science sooner : Excellence in science education must begin in kindergarten. *Scientific American*, (March).
- [62] The Interacademy Partnership (IAP) (2012). Taking inquiry-based science education into secondary education. report of a global conference. <http://www.sazu.si/files/file-147.pdf>.
- [63] url. <http://www.fondation-lamap.org>.
- [64] url. <https://interstices.info>.
- [65] url. <http://www.smac.ulaval.ca>.
- [66] url. <https://www.apprendreaapprendre.com>.
- [67] url. <http://www.cpge.ac.ma/documents/Cont/RapRentreeCPGE1516.pdf>.
- [68] url. <http://www.luma.fi/en>.
- [69] url. <https://www.youtube.com/watch?v=k1XDkXWKMQU>.
- [70] url. https://www.youtube.com/watch?v=INHF_5RIxTE.
- [71] url. <https://www.raspberrypi.org>.
- [72] url. <http://tinyurl.com/gq7ns8b>.
- [73] url. <http://africacodeweek.org>.
- [74] url. <http://codeweek.eu>.
- [75] url. <https://coderdojo.com>.
- [76] url. <https://www.uclouvain.be/362060.html>.
- [77] url. <http://www.pollen-europa.net>.

- [78] url. <http://www.sinus-transfer.de>.
- [79] url. <https://obamawhitehouse.archives.gov/node/326121>.
- [80] url. <http://mathamaze.ca>.
- [81] url. <http://www.jeanmariiedekoninck.mat.ulaval.ca/accueil>.
- [82] Wing, J. M. (2006). Computational thinking. *Communications of the ACM*, 49(3) :33–35.
- [83] WISE Education Survey (2015). Connecting education to the real world. http://www.wise-qatar.org/sites/default/files/asset/document/wise_survey_report_2015.pdf.
- [84] Yadav, A. and Cooper, S. (2017). Fostering creativity through computing. *Communications of the ACM*, 60(2) :31–33.
- [85] Zakhartchouk, J.-M. (2017). *Apprendre à apprendre*. Eclairer. Réseau Canopé.