
ARTICULER LES APPRENTISSAGES EN SCIENCES ET MATHÉMATIQUES PAR DES DÉMARCHES EXPÉRI- MENTALES CODISCIPLINAIRES

Gilles ALDON
Réjane MONOD-ANSALDI
Michèle PRIEUR

IFÉ-ENS de Lyon
S2HEP, Université Lyon 1

Dans les démarches d'investigation en sciences, les mathématiques sont généralement présentes mais pas toujours visibles ni rendues visibles. Les savoirs mathématiques peuvent être convoqués à des niveaux différents qu'il s'agit d'identifier et de définir pour permettre aux enseignants et aux élèves de prendre conscience de la mise en œuvre de ces savoirs dans un travail scientifique. Les mathématiques sont souvent considérées comme une discipline de service, comme un outil pour les autres sciences si bien qu'elles ne sont utilisées en sciences que d'une façon marginale alors que, bien souvent, les démarches d'investigation conduisent les élèves à soulever des questionnements qui peuvent être pensés à travers des concepts mathématiques. Ce texte propose d'explorer la place et le rôle des savoirs mathématiques dans le cadre des expé-

érimentations sur le vivant à l'école primaire. Après avoir caractérisé ces expérimentations et montré en quoi les mathématiques peuvent prendre en charge des problèmes méthodologiques qui leur sont associés, nous montrons, à partir de quelques exemples, comment les mathématiques participent à la conduite de ces démarches et comment, en miroir, ces démarches sont, ou pourraient être, l'occasion d'apprentissages propres à cette discipline.

Ce travail s'appuie sur les observations réalisées dans le cadre du projet *Développement de la culture scientifique, égalité des chances*, conduit dans un lieu d'éducation associé (LéA) à l'Institut Français de l'Éducation (IFE), le LéA Côte d'Or ; ce LéA est construit en partenariat entre l'IFE, la direction des services dépar-

tements de l'Éducation nationale de la Côte d'Or et la ville de Dijon¹. Les enseignants, formateurs et chercheurs, engagés dans ce projet, mettent en œuvre une méthodologie de type *design based research* (Wang, Hannafin, 2005) pour co-concevoir des séquences d'investigation en sciences. L'élaboration de ces ressources repose sur des boucles itératives de conception, expérimentation, analyse, amélioration. Une telle méthodologie contribue à produire des ressources adaptées, utiles et utilisables par d'autres acteurs, mais elle permet également de soulever des problématiques qui émanent du terrain favorisant ainsi une co-construction de savoirs scientifiques.

1. — Expérimenter sur le vivant à l'école primaire

1.1. Le cadre des instructions officielles

Le plan de rénovation de l'enseignement des sciences et de la technologie à l'école (PRESTE) se propose « *d'assigner une dimension expérimentale à l'enseignement des sciences et de la technologie au primaire, ainsi que de développer les capacités d'argumentation et de raisonnement des élèves, en même temps que leur appropriation progressive de concepts scientifiques* » (BO N°23 du 15 juin 2000). Il s'agit en particulier de formuler des interrogations sur un phénomène réel et proche qu'on a observé et d'envisager des réponses en conduisant « *des investigations réfléchies, mettant en œuvre des démarches concrètes d'expérimentation, complétées le cas échéant par une recherche documentaire* » (BO N°23 du 15 juin 2000).

Le programme d'enseignement de l'école primaire relatif aux sciences de la vie (BO N°3

du 19 juin 2008) concerne la découverte du vivant et l'étude de son fonctionnement. A l'école maternelle, « *Les enfants observent les différentes manifestations de la vie. Élevages et plantations constituent un moyen privilégié de découvrir le cycle que constitue la naissance, la croissance, la reproduction, le vieillissement, la mort* », pour commencer à « *comprendre ce qui distingue le vivant du non-vivant* ». Au cycle des apprentissages fondamentaux, il s'agit de repérer « *des caractéristiques du vivant : naissance, croissance et reproduction ; nutrition et régimes alimentaires des animaux.* » et de comprendre « *les interactions entre les êtres vivants et leur environnement* ». Au cycle des approfondissements, l'étude s'intéresse à l'unité et la diversité du vivant, et à son fonctionnement en particulier à travers les « *stades du développement d'un être vivant, les conditions de développement des végétaux et des animaux, et le fonctionnement du corps humain et de la santé* ». Ces prescriptions en termes de contenus et de méthodes amènent les enseignants et les élèves à mener des démarches expérimentales sur le vivant, mettant en jeu notamment des plantations et des élevages, comme le programme d'enseignement l'indique lui-même. Quelles sont les caractéristiques des expérimentations sur le vivant ?

1.2. Les particularités des expérimentations sur le vivant

Les êtres vivants possèdent des caractéristiques propres qui conditionnent leur étude en biologie expérimentale. En effet, de par ses dimensions, sa variabilité et sa complexité le vivant ne se conceptualise ni ne se modélise facilement (Coquidé et al, 1999). Déjà en 1965, Canguilhem attirait l'attention sur la spécificité, l'individualisation, l'irréversibilité et la totalité du vivant. La spécificité correspond à l'existence d'un très grand nombre d'espèces différentes, qui ne partagent pas toutes les mêmes propriétés.

¹ <http://ife.ens-lyon.fr/sciences21>

L'individualisation réfère au fait que chaque organisme est singulier, différent d'un autre, même s'il appartient à la même espèce. L'irréversibilité concerne la transformation permanente de chaque être vivant au cours du temps (croissance, senescence, rythmes biologiques). La totalité décrit la constitution de chaque organisme comme un ensemble de parties organisées, un système dynamique et régulé, qui, de plus, est en interaction avec le milieu dans lequel il se trouve. Pour appréhender des objets vivants, le scientifique invente donc des protocoles originaux et des techniques proprement biologiques (Canguilhem, 1965). Il invente des instruments pour rendre visible ce qui ne l'est pas. Il prête attention à la variable temporelle, contrôle le milieu dans lequel il place les êtres vivants, tient compte de la variabilité en se gardant de généralisations trop rapides d'un individu à une espèce entière ou d'une espèce à d'autres. Pour comprendre le fonctionnement d'un système, il passe par des simplifications et des modélisations, isolant un élément ou un facteur, pour analyser sa fonction, et déploie des stratégies d'analyse systémique pour aborder la complexité. Il considère également l'aspect éthique de ses manipulations, l'intervention expérimentale modifiant, perturbant ou détruisant les systèmes étudiés. Coquidé (2000) décrit ainsi différentes étapes de l'expérimentation biologique au cours de l'histoire des sciences, montrant comment un concept, un modèle ou un nouveau type d'instrument permettent de questionner et de diversifier les modalités d'investigation du vivant.

1.3. *Des expériences en classe avec des végétaux*

Certaines des caractéristiques du vivant sont étudiées directement dans le programme de l'école primaire. Les concepts de stades de développement et de croissance sont en lien avec l'évolution dans le temps des êtres vivants (irréversibilité). Les relations des êtres vivants

avec leurs milieux sont abordées par l'étude des besoins nutritifs et des interactions entre les êtres vivants et leur environnement. La spécificité est vue à travers la diversité du vivant, par comparaison entre plusieurs espèces. En revanche, l'individualisation et la totalité ne sont pas abordées directement. Elles contraignent toutefois les expérimentations réalisables en classe et les conclusions qui peuvent en être tirées.

Mener des démarches expérimentales à l'école nécessite en effet de pouvoir manipuler des êtres vivants visibles et d'étudier des phénomènes mesurables dont la vitesse et la durée sont compatibles avec le temps de la classe, en restant dans un cadre éthique acceptable. Travailler sur des conditions de développement implique de contrôler le milieu, d'en isoler certains facteurs, de s'engager dans des protocoles comparatifs construits. Prendre en compte la variabilité du vivant amène à travailler avec plusieurs espèces, et plusieurs individus pour chaque espèce, ce qui implique d'en disposer facilement.

Pour toutes ces raisons, les végétaux représentent un matériel de choix pour les expérimentations scolaires. Ils sont divers, faciles à obtenir et à cultiver. Il existe de nombreuses espèces dont le cycle de vie est court, et qui permettent de travailler sur les populations de graines ou de plantules sans trop de frais ou d'espace. On accepte aussi plus facilement de couper des végétaux, de les placer dans des conditions ne permettant pas leur survie, de provoquer leur étiolement ou leur mort.

La mise en œuvre de démarches expérimentales pour étudier les besoins des végétaux, leur germination ou leur croissance, consiste alors à recueillir, représenter et traiter des données. A chaque étape, se posent des problèmes méthodologiques particuliers qui mobilisent des outils mathématiques. Cet article propose

de repérer ces problèmes méthodologiques, d'identifier les outils mathématiques associés et d'explorer leur fonctionnement dans la classe. Il s'agit de chercher comment les démarches expérimentales peuvent permettre de construire du sens, autant pour les apprentissages mathématiques que scientifiques.

2. — Les savoirs mathématiques : des outils au service des expérimentations

2.1 *Les problèmes méthodologiques soulevés par les expérimentations sur les végétaux*

A l'école primaire, les activités expérimentales liées à l'étude du cycle de vie des végétaux sont souvent réalisées pour les raisons présentées ci-dessus. Elles soulèvent un ensemble de problèmes méthodologiques liés aux caractéristiques du vivant.

Un végétal s'inscrit dans le temps et sa nutrition, sa croissance, sa reproduction sont des mécanismes qui se déroulent sur des durées supérieures à celle d'une séance d'enseignement. Expérimenter sur les végétaux à l'école suppose d'une part que les élèves se repèrent au fil des jours et des semaines, et d'autre part qu'ils apprécient les variations du végétal au cours du temps. De telles expérimentations demandent donc de prendre en charge la variable temporelle depuis la conception du protocole jusqu'à l'analyse des résultats.

Les phénomènes qui accompagnent le cycle de vie des végétaux sont sous la dépendance d'un certain nombre de facteurs de l'environnement : eau, lumière, éléments minéraux, température. L'étude de l'influence d'un facteur donné sur l'un de ces phénomènes ne peut se faire qu'en isolant son influence. Cette dissociation des facteurs vise à ne faire varier que celui que l'on souhaite étudier, il représente alors une

variable de l'expérience. L'expérience se traduit par la mise en place de deux dispositifs identiques à la valeur de la variable près, l'un des dispositifs étant le témoin de l'autre (Darley, 2007). L'influence de cette variable est ensuite déterminée par une analyse comparative entre les résultats expérimentaux issus de ces deux dispositifs. Cette analyse s'appuie rarement sur des résultats expérimentaux bruts. Généralement, les données recueillies au cours d'une expérimentation subissent un traitement pour pouvoir être interprétées au regard de l'hypothèse testée. Ce traitement s'appuie sur des calculs et des représentations qui s'inscrivent dans le temps et dans l'espace.

Expérimenter sur les végétaux implique des choix et des précautions liés à la variabilité du vivant, variabilité inter et intra-spécifique. Pour s'assurer de la reproductibilité et du caractère significatif des résultats obtenus, il est nécessaire de s'interroger sur le nombre d'essais à réaliser et sur le traitement des données recueillies. Prévoir un témoin et prendre en compte la variabilité des individus conduit à multiplier le nombre de tubes, de flacons et de plantes mobilisés au cours d'une expérience. Sa mise en œuvre suppose une organisation de l'ensemble du matériel expérimental dans l'espace de la classe.

Nous venons de montrer qu'expérimenter sur les végétaux, dans le cadre des programmes de l'école primaire, pose un certain nombre de problèmes méthodologiques qui requièrent des outils mathématiques depuis la conception du protocole expérimental jusqu'à l'interprétation des résultats. Nous proposons d'exemplifier dans la suite du texte comment les mathématiques aident à inscrire l'expérimentation dans le temps et l'espace, à conduire une analyse comparative des résultats et à gérer la variabilité du vivant. Les exemples proposés sont issus de trois séquences d'enseignement : l'étude des besoins en eau des plantes dans une



Figure 1 : Le repérage des plantes arrosées et non arrosées à l'aide du code

classe de maternelle grande section (GS)², l'étude des facteurs contrôlant la germination et la croissance de bulbes en classe de cours préparatoire (CP) et l'étude de la localisation de l'entrée d'eau dans la plante par une classe de cours moyen (CM)³. Ces séquences ont été conçues en collaboration avec Bénédicte Foulet, Agnès Golay, Ingrid Piccioli et Céline Stroll, enseignantes et formatrices à Dijon.

2.2 Conduire une étude comparative

Une analyse comparative s'appuie sur une expérimentation rigoureuse qui, à tout moment, considère le dispositif et son témoin de façon identique. Nous proposons ces exemples en GS, CP et en CM qui montrent comment des outils mathématiques participent à cette étude comparative.

Dans l'étude des besoins en eau des végétaux, les élèves de GS jouent sur la variable *arrosage*. Ils observent et comparent les transformations des plantes arrosées et des plantes non arrosées au cours du temps. Pour repérer la

variable étudiée, ils utilisent des signes : le schéma d'une goutte d'eau désigne *ce qui est arrosé*, une croix désigne *ce qui n'est pas arrosé*. Ce code, qui relie le signifiant et le signifié est utilisé sur les pots des plantes, dans le coin observation de la classe, sur les dessins d'observation des élèves. Le signe *goutte d'eau* permet encore de repérer les jours d'arrosage sur le calendrier de la classe (Fig. 1).

Pour s'approprier la variable étudiée et le code utilisé, une activité de tri est proposée aux élèves : ils séparent en deux collections un ensemble de pots portant un signe ou l'autre. Ainsi le code et ses utilisations permettent aux élèves de bien identifier la variable en jeu et de repérer les différentes conditions de culture (les plantes et les plantes témoins) sur la durée de l'expérience. Les élèves de CP étudient les effets du support sur la germination des graines. Ils mettent en place deux dispositifs, dans l'un d'entre eux les graines sont placées sur la terre, dans l'autre sur du coton. Afin de maintenir un arrosage constant, ils choisissent une unité de mesure définie en nombre de cuillère à soupe.

Pour étudier l'absorption d'eau par une plantule avec et sans racines, les élèves de

² <http://ife.ens-lyon.fr/sciences21/ressources/besoin-eau-GS>
³ <http://ife.ens-lyon.fr/sciences21/ressources/absorption-vegetaux>

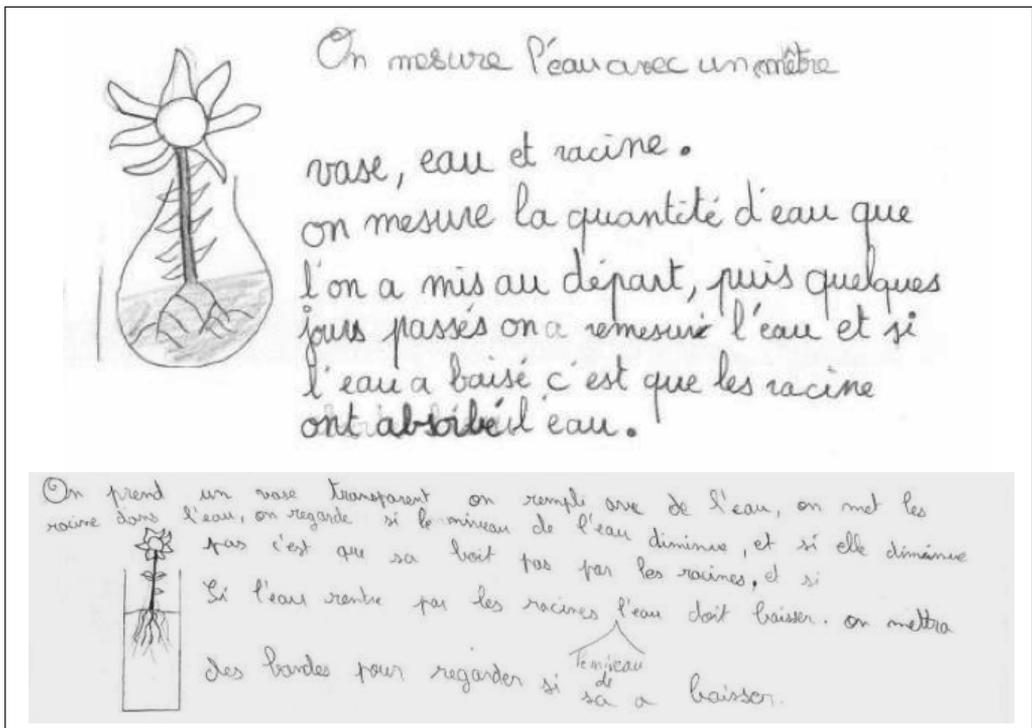


Figure 2 : Exemples de protocoles expérimentaux produits par les élèves, mobilisant la mesure du niveau de l'eau.

CM placent des plantules dans des tubes à essais et mesurent à périodes régulières la hauteur d'eau dans les tubes. Ils déterminent l'absorption d'eau par les plantes en appréciant l'abaissement du niveau d'eau dans le tube (figure 2), ils calculent cette baisse de niveau en soustrayant la hauteur d'eau en fin d'expérience à la hauteur d'eau initiale. Ce calcul ainsi que la comparaison des résultats entre une plantule avec et sans racine nécessite de travailler dans un même système d'unité de mesure et d'envisager des conversions d'unité si des choix différents ont été opérés entre les mesures.

Ces trois exemples montrent une diversité d'outils mathématiques mobilisés pour conduire une étude comparative entre les résultats issus des différents dispositifs de l'expérience : codage, tri, choix d'une unité de mesure, conversion d'unité de mesure, calcul.

2.3 Incrire l'expérimentation dans le temps et l'espace

Expérimenter sur les végétaux conduit à aborder le temps dans ses deux dimensions, sagittale et cyclique. Si les végétaux s'inscrivent dans un temps historique irréversible où chaque ins-

tant est unique, ils s'inscrivent encore dans un temps cyclique basé sur la répétition des saisons.

Les élèves de GS ont expérimenté sur des plantes herbacées et ont étendu les résultats obtenus aux arbres. Pour cela, ils ont au préalable observé et comparé l'appareil végétatif (tronc, tige, feuilles, racines) et l'appareil reproductif (fleurs, fruits) de plantes herbacées et d'arbres. Ces observations conduisent à situer les végétaux dans le cycle annuel des saisons.

Conduire une expérience sur le vivant, c'est l'inscrire dans la durée du temps historique. C'est par exemple prélever des données (faire une mesure, un dessin d'observation, écrire un texte de description, ...) à des instants choisis, pour reconstituer l'évolution du phénomène étudié qui lui se déroule dans un temps continu, autrement dit, la variable temps, variable continue est transformée en variable discrète. C'est également gérer la dynamique du système expérimental en contrôlant et régulant les conditions tout au long de l'expérience. Ainsi, l'étude de l'influence de l'eau sur la croissance ou la germination des végétaux conduit à une expérience où le végétal est dans un milieu humide, le taux d'humidité devant être maintenu constant. Pour cela, la classe de GS choisit d'arroser ses plantes chaque fois que la terre devient sèche. En fin d'expérience, les élèves comptent sur le calendrier, le nombre de fois où les plantes ont été arrosées. Certains élèves de la classe de CP proposent d'arroser les graines tous les jours, d'autres 4 jours sur 7, d'autres encore 3 fois par jour. En déterminant les modalités d'arrosage dans le temps, en dénombrant le nombre d'arrosage sur la durée de l'expérience, ces élèves travaillent les notions de durée, de période et de fréquence.

Pour conduire efficacement de telles expériences, les élèves ont besoin de se repérer dans le temps en identifiant à quels moments les

plantes sont arrosées et à quels moments les données sont recueillies. Pour cela, ils mobilisent différents outils. Les élèves de GS reportent sur le calendrier de la classe les jours d'arrosage. Ceux du CM utilisent un tableau à double entrée, un tel tableau prend en compte l'ensemble des variables de l'expérience : le temps et l'autre variable étudiée (absorption par les racines ou par les feuilles selon les groupes d'élève). Calendrier, frise, tableau à double entrée sont des outils mathématiques opératoires pour aider les élèves à se repérer dans le temps.

Les expérimentations conduites par les élèves entretiennent également un rapport étroit avec l'espace. En effet, l'étude de la croissance et des besoins nutritifs des végétaux se traduisent le plus souvent par des variations de longueur qu'il s'agit de mesurer. Les élèves de CM évaluent la quantité d'eau absorbée par les plantules par une mesure de l'abaissement du niveau d'eau dans le tube. La mesure est effectuée entre deux repères choisis par les élèves pour définir la distance entre le niveau d'eau initial et le niveau en fin d'expérience. Ils effectuent leur mesure à l'aide d'une règle graduée ou d'un papier millimétré collé sur le tube et l'expriment en mm ou en cm. Les élèves de CP évaluent la croissance d'un bulbe d'Amaryllis par l'accroissement de sa pousse principale. Cette plante présente l'intérêt d'être de grande taille et d'avoir une pousse principale rectiligne qui grandit très vite. Tous les trois jours, l'enseignante projette l'ombre de cette pousse sur une affiche et les élèves tracent au feutre les limites de l'ombre portée. Les positions de la source de lumière (un vidéoprojecteur) et de la plante sont conservées entre deux dessins. La taille de l'ombre est mesurée à l'aide d'une unité de mesure définie en mathématiques, il s'agit d'une bandelette de papier correspondant à une unité arbitraire. Le premier jour, les élèves colent sur l'affiche des bandelettes entre la base

et le sommet de l'ombre, le nombre de bandelettes alignées définit ainsi la taille de l'ombre. Les jours suivants, ils ajoutent des bandelettes sur l'affiche pour définir la nouvelle taille du bulbe. L'accroissement du bulbe est déterminé par la différence entre le nombre de bandelettes au jour $n+1$ et au jour n (Fig. 3).

Ces expérimentations mobilisent différents savoirs mathématiques. Dans les deux cas, le phénomène observé, abaissement du niveau d'eau ou accroissement de l'ombre, est modélisé par un segment dont il s'agit de mesurer la longueur. Ces mesures mobilisent des outils et des unités de mesure adaptées, que celles-ci soient arbitraires ou universelles. Le dessin de la pro-

jection de l'ombre sur une affiche correspond au passage d'un objet réel tridimensionnel à un objet dans un plan plus facile à mesurer. Il implique un changement de repère, la taille de l'ombre n'étant pas celle de la plante. Les savoirs mathématiques mobilisés au cours de ces expérimentations participent à la construction de l'espace chez les élèves.

2.4 Gérer la variabilité des végétaux

La variabilité du vivant concerne plusieurs niveaux : variabilité interspécifique (entre espèces différentes, en lien avec la spécificité), variabilité intra-spécifique ou interindividuelle (à l'intérieur d'une même espèce, en lien

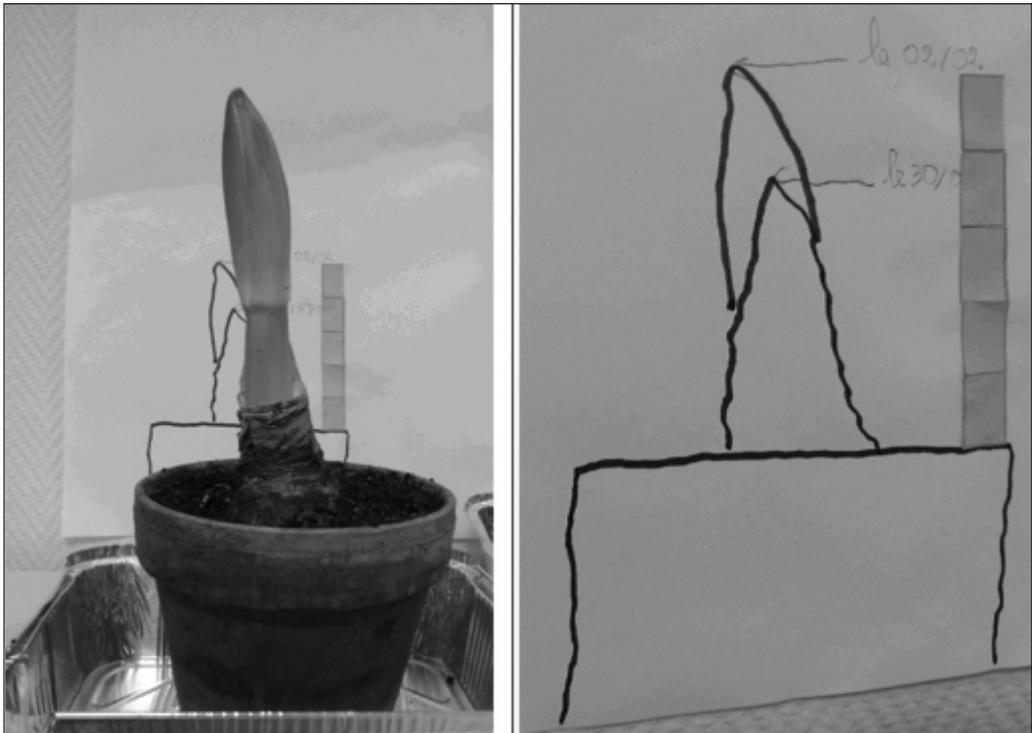


Figure 3 : Mesure de la taille du bulbe d'amarillis.

avec l'individualisation), et variabilité intra-individuelle (d'un même individu au cours du temps et en fonction de son environnement, en lien avec l'irréversibilité). Seules les variabilités interspécifique et intra-individuelle sont abordées dans les programmes de l'école primaire. La première à travers la diversité des espèces, qu'il s'agira de classer et dont on cherchera les propriétés semblables pour montrer également l'unité ; la seconde à travers la description des cycles de développement (germination, croissance, floraison...). Il s'agit plus de construire ces notions que de les prendre en compte pour expérimenter. L'expérimentation en classe peut être l'occasion pour les élèves de se confronter à la variabilité interspécifique du vivant. Menant des expériences sur les besoins en eau avec différentes espèces de plantes, des élèves de GS ont pu se rendre compte que pour maintenir la terre humide dans les pots, la quantité d'eau nécessaire varie d'une espèce à l'autre. Des élèves de CP, mettant à germer différentes sortes de graines, ont pu observer non seulement que la forme des graines et des plantules diffère, mais également que le nombre de graines entrant en germination n'est pas identique d'une espèce à l'autre. Du point de vue mathématique, il s'agit de produire des données en dénombrant et mesurant (dénombrer les graines germées, mesurer la longueur des plantules ou la quantité d'eau utilisée), et de comparer ces données entre espèces, en ordonnant les nombres.

L'expérimentation en classe peut également amener les élèves à se questionner sur la variabilité interindividuelle, pour peu que plus d'un individu de la même espèce soit utilisé. Plaçant plusieurs glands à germer dans différentes conditions au retour d'une sortie en forêt, les élèves de CP se sont rendu compte que tous les glands placés dans les mêmes conditions n'ont pas le même comportement. Un seul des 8 glands placés dans la terre et arrosés a donné naissance à une plantule. Comment expliquer

l'absence de germination des autres ? On est bien obligé de se dire que tous les glands qui semblaient identiques ne l'étaient pas, certains étant plus susceptibles que d'autres de germer dans ces conditions. On se confronte ici à la variabilité interindividuelle. Mais alors, pourquoi les glands placés sur la terre, ou à l'obscurité, ou sans arrosage n'ont-ils pas germé ? Cela vient-il des conditions appliquées ou des glands eux-mêmes ? Comment le savoir ? Le nombre de glands utilisé permet-il de conclure ? Cette situation, simple à réaliser car les glands germent difficilement hors de la forêt, pose la question méthodologique du nombre d'individus à considérer dans une expérimentation. Donner le résultat pour une espèce à partir d'un échantillon relève d'un travail de statistique difficile à aborder à l'école primaire dans les détails mais qu'il est en revanche possible de faire ressentir à travers une telle expérience.

Tenir compte de la variabilité du vivant pour expérimenter implique de concevoir et mettre en œuvre des protocoles impliquant plusieurs essais dans les mêmes conditions et mobilisant des effectifs élevés. Peuvent alors se poser des problèmes méthodologiques de dénombrement, plus ou moins faciles à résoudre suivant la taille et la maniabilité du matériel biologique. Les élèves de CP pensant avoir placé 20 petites graines de laitue à germer dans une boîte, constatent ainsi avec surprise l'apparition de 25 plantules (la taille de ces graines est de l'ordre du mm).

Les données générées par ce type d'expérience sont des effectifs (tant de graines germées parmi tant de graines placées dans telles conditions) ou des séries de données (n longueurs de n plantules après 7 jours dans telles conditions). Comment traiter ces ensembles de données ? Comment les comparer entre eux puisque les protocoles mis en œuvre sont souvent comparatifs ? Les savoirs mathématiques qui per-

mettent d'aborder ces problèmes méthodologiques concernant les indicateurs statistiques de séries de mesures (minimum, maximum, moyenne, médiane, écart-type...), mais aussi la notion d'intervalle de confiance ou de test statistique. Comment déterminer si la variabilité de résultats observée entre deux conditions expérimentales provient de la variabilité des plantes utilisées, ou est significative et imputable au facteur différenciant entre ces conditions ?

3. — Comment ces savoirs mathématiques fonctionnent-ils dans la classe ?

La question est de savoir si les concepts mobilisés lors des expérimentations sur le vivant sont déjà présents, ou à consolider, ou à construire pour les élèves. Nous proposons

une typologie, caractérisant la place des mathématiques dans le cours de sciences à différents niveaux et l'illustrons par les observations menées en classe.

Nous distinguons cinq niveaux de mobilisation des savoirs mathématiques dans les démarches d'investigation qui peuvent être tous ou en partie présents dans une activité scientifique ; chacun de ces niveaux est bien entendu directement connecté au développement des connaissances ; ce qui est vrai en CM2 ne l'était pas forcément en CP. Les niveaux sont présentés dans le tableau 1. On dira qu'un savoir est naturalisé lorsqu'il peut être mobilisé dans toute circonstance sans réflexion particulière. Ainsi par exemple, le décompte de graines, qui relève de l'énumération, est un savoir naturalisé en cycle 3 alors qu'il peut

Niveau	Caractérisation	Exemple dans la classe de CM2
0 - Utilisation	Utiliser de savoirs mathématiques naturalisés.	Compter les graines germées.
1 - Approfondissement	Manipuler des connaissances en voie de naturalisation.	Utiliser un tableau à double entrée.
2 - Construction	Participer à la construction du sens d'une notion en cours de naturalisation.	Utiliser la soustraction pour décrire un accroissement.
3 - Questionnement	Questionner un savoir mathématique par son utilisation dans un contexte scientifique.	Traiter un ensemble de mesures provenant de plusieurs plantes placées dans des conditions identiques.
4 - Révélation	Construire un nouveau concept mathématique pour avancer dans la question scientifique posée.	Comprendre les rapports entre les mesures de l'ombre et de la plante.

Tableau 1 : Les niveaux d'investissement des mathématiques dans le cadre d'expérimentations en sciences.

être en voie de naturalisation dans des classes antérieures.

Le premier niveau d'utilisation concerne les savoirs mathématiques naturalisés qui sont utilisés d'une manière transparente par les élèves et qui ne sont pas pointés par le professeur ; il peut s'agir, par exemple, dans une classe de CM2 du décompte des graines placées dans une soucoupe pour suivre leur germination, ou, en CP, du tri des pots qui ont été arrosés et des pots non arrosés. Les connaissances mathématiques ont déjà été institutionnalisées et, dans leurs mises en œuvre, elles sont immédiatement accessibles aux élèves et l'activité en elle-même n'est pas nécessaire au développement de ces connaissances : elles existent, elles fonctionnent et le travail repose naturellement sur leur mobilisation.

Le niveau d'approfondissement concerne les connaissances déjà institutionnalisées mais qui ne sont pas encore naturalisées. Elles sont disponibles, elles ont déjà été utilisées mais l'activité participe à leur naturalisation. C'est le cas du repérage dans le temps, à partir du calendrier de la classe, pour régler la fréquence des arrosages dans l'expérience déjà mentionnée en GS, ou de l'utilisation d'un tableau à double entrée en CM2 pour recueillir ou communiquer les résultats d'une expérience ; comme le signale l'enseignante : « le tableau à double entrée est normalement une compétence acquise en fin de cycle 3. Par contre, pour mes élèves dont beaucoup rencontrent des difficultés, cette utilisation a été l'occasion de revenir sur cette compétence, de la conforter pour certains. » (CM2). Une partie des compétences nécessaires à l'investigation participe à l'approfondissement des connaissances mathématiques même si l'objectif premier de l'activité proposée n'est pas mathématique.

Le niveau de construction permet de donner du sens à des savoirs mathématiques déjà

rencontrés en mathématiques ; c'est le moment de construire le sens des objets mathématiques utilisés en mettant en relation leur fonctionnement technique et leur signification dans un contexte scientifique. L'utilisation de la soustraction dans la description de l'accroissement d'une plante, dans une expérience comparée de croissance des plantes, en est un bon exemple dans la classe de CM2. .

Les deux derniers niveaux, bien que très peu observés, sont souvent potentiels dans les activités d'investigation. Une analyse *a priori* de la situation proposée peut permettre de les mettre en évidence et de les inclure dans les objectifs d'apprentissage comme on le verra dans les prolongements possibles proposés dans le paragraphe 4.

Le niveau de questionnement met en jeu les limites des domaines de validité de résultats obtenus avec des outils mathématiques. Ainsi, par exemple, dans la classe de CM2, le problème de la comparaison des croissances des végétaux dans des conditions différentes (avec et sans racines) pose clairement le problème de la mesure qu'il va falloir considérer pour faire une comparaison. Dans chacun des essais en lien avec la variabilité du vivant, le nombre de graines germées a été différent et la question d'un effectif représentatif de l'expérience se pose. Faut-il considérer la moyenne, mais quelle est l'influence sur cette moyenne des valeurs extrêmes, faut-il éliminer de l'échantillon les valeurs extrêmes ? Avec quels arguments ? Le dialogue entre les disciplines permet alors de faire un choix et de traiter mathématiquement les données sous l'hypothèse (au sens mathématique) inférée par ce choix. Un autre exemple, plus strictement interne aux mathématiques, concerne les mesures elles-mêmes de la croissance des plantes : utilisation de l'ombre portée d'une plante dans des conditions identiques de positionnement d'un projecteur. Les ques-

tions mathématiques qui pourraient survenir concernent le rapport entre la mesure de la plante et la mesure de l'ombre : sont-elles identiques ? Et si elles ne le sont pas, la comparaison entre deux mesures est-elle pertinente pour répondre à la question de la croissance ? Quelle signification les nombres obtenus ont-ils ? Autant de problèmes méthodologiques qui permettent alors de questionner les savoirs mathématiques.

Le niveau de révélation permet de problématiser mathématiquement une question qui ne pourrait pas être résolue sans l'acquisition d'un nouveau savoir. L'exemple précédent de la mesure de l'ombre peut être prolongé par des questions plus précises sur le rapport des longueurs de l'ombre et de la plante. Un autre exemple, tiré des expérimentations en classe de CP concerne la variabilité biologique et la description mathématique de cette variabilité : combien de graines faut-il utiliser pour expérimenter la germination d'une graine dans un contexte donné ? Le questionnement issu de l'expérience scientifique pourrait alors être à l'origine de la construction d'une situation didactique en mathématiques dont l'objet serait l'étude des caractéristiques d'une série statistique et de leurs significations.

4. — Des pistes pour mobiliser d'autres niveaux du modèle

Comme il est déjà signalé plus haut, dans les observations faites en classe, les deux niveaux de « questionnement » et de « révélation » n'ont pratiquement pas été investis. Les situations contenaient cependant des potentialités suffisantes pour questionner ou pour construire des connaissances mathématiques à partir du contexte de l'investigation. C'est cet aspect que nous allons développer dans ce paragraphe en nous appuyant sur les observations de classes. Il est essentiel

de noter que ces mobilisations des niveaux 3 et 4 du modèle ne peuvent que difficilement être envisagées dans le cours de la leçon sans qu'une réflexion préalable ne permette à l'enseignant de repérer, dans les interactions, ces moments où il est possible de questionner les mathématiques dans le cours de l'investigation. Cette mobilisation de concepts mathématiques nécessite une analyse *a priori* qui permet ensuite de saisir les opportunités dans le cours de la classe en s'appuyant sur le travail des élèves. Dans le même projet de recherche, et dans la classe de CE1 de Florence Bergeret⁴, le passage à une représentation abstraite de la hauteur d'eau recueillie lors de la fonte d'un glaçon en fonction du temps illustre cet investissement du niveau de révélation : les enfants savent reporter sur une feuille une hauteur d'eau en utilisant le dessin d'une éprouvette et l'accumulation des dessins permet de voir l'évolution des observations recueillies par chacune des expériences. La comparaison des différentes représentations permet de comparer la vitesse de fonte dans l'une ou l'autre des expériences (Fig. 4). L'exemple déjà cité de la mesure de la croissance de l'Amaryllis en CP aurait pu être prolongé, sur ce même modèle, pour commencer à construire le concept abstrait de représentation d'une grandeur en fonction d'une autre et ainsi participer à l'acquisition de la compétence « construire et interpréter un graphique ».

Nous nous appuyerons dans la suite sur un exemple permettant de proposer des pistes en termes d'activités possibles aux niveaux 3 et 4 dans la classe de CM2 étant bien entendu que ce travail de réflexion, typique de la méthodologie de Design Based Research, aurait pu être travaillé sur toutes les situations précédemment décrites.

⁴ Florence Bergeret, Marie-Christine Verpillat et Karine Bécu-Robinault ont collaboré à la conception des ressources : <http://ife.ens-lyon.fr/sciences21/ressources/Fusion>

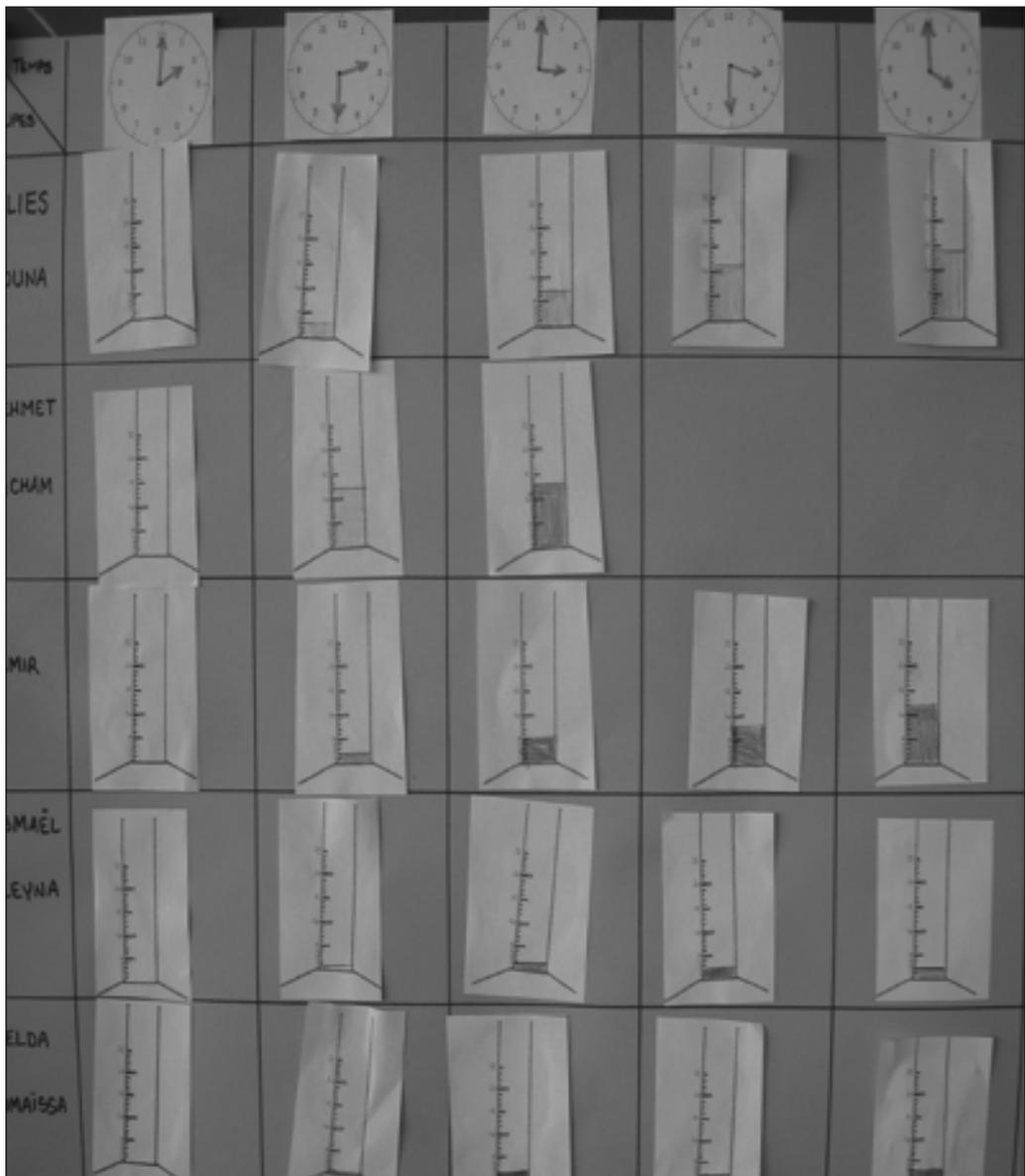


Figure 4 : La fonte des glaçons en fonction du temps.

Dans une séance observée de CM2, le professeur vise le passage de la description de l'expérience à la conclusion, qui selon elle, est un moment crucial et difficile pour les élèves. Les élèves ont imaginé et réalisé des expériences permettant de montrer que la plante absorbe l'eau par ses racines. Un des aspects de cette description des résultats de l'expérience est passé par la mesure de la longueur de la plante à différents instants, de la transcription de l'accroissement de la plante, et de la quantité d'eau versée dans le récipient. Les élèves souhaitent montrer l'absorption d'eau par les racines en appréciant d'une part la consommation de l'eau dans le tube et d'autre part la croissance de la plante. Pour neutraliser le phénomène d'évaporation de l'eau, il ont placé un bouchon sur leurs tubes. La description des résultats de l'expérience passe donc par des mesures de longueur à différents instants et par leur transcription en accroissement. Les dialogues dans les groupes ou avec le professeur montrent que la notion d'accroissement et d'abaissement ne sont pas stabilisées, comme l'attestent ces quelques extraits de description de leur expérimentation par les élèves :

- « Puis voilà. Et on met euh, une bande de papier millimétré sur le vase, et on fait un repère sur le niveau de l'eau et on regarde le niveau de l'eau, si il baisse au moins deux jours. »
- « Et les plantes avec racines ont grandi deux fois. »
- « Et bien alors, les 4 plantes qui n'ont pas été couvertes. Il y en a une qui n'a pas baissé beaucoup, mais elle n'a pas fané. »
- « Nos conclusions, c'est que elles ont diminué, jusqu'à... (lisant). Il y en a une qui a diminuée jusqu'à 27 millilitres de moins, mais la plante est morte. »

Le questionnement de la mesure de longueurs et de leur transcription en accroissement pou-

vait ici apparaître naturellement pour préciser les résultats obtenus. C'est un travail d'autant plus intéressant qu'il concerne d'une part l'accroissement positif de la taille de la plante en fonction du temps et l'accroissement négatif de la quantité d'eau en fonction du temps.

Cette introduction de la notion d'accroissement peut être construite à partir des mesures effectuées et des opérations à mettre en œuvre en commençant par la mesure elle-même de la plantule. Certaines questions peuvent alors mener à construire et à visualiser la notion d'accroissement et amener ce concept au niveau 3 de notre classification : comment pratiquement mesurer une plantule ? Quelle unité de longueur va être utilisée ? Comment les résultats des observations vont-ils être représentés ? Quelle opération est mobilisée pour décrire l'accroissement de la plantule ? Est-ce que les résultats obtenus permettent de comparer les accroissements de deux essais ? En ce qui concerne la quantité d'eau dans les récipients : quelle unité de mesure peut-on utiliser ? En particulier, si les récipients ont une section horizontale constante, le volume sera proportionnel à la hauteur et l'utilisation des unités de longueur pourra se justifier pour décrire l'accroissement de la quantité d'eau. Quelle soustraction réaliser ? Contrairement à la longueur des plantules, la quantité d'eau va diminuer et l'opération à poser pour mesurer l'accroissement sera la quantité à l'instant t moins la quantité à l'instant $t+1$. Ces calculs permettent de mettre en évidence l'évaporation obtenue dans le dispositif témoin, un récipient rempli de la même quantité d'eau mais sans plante, et donc de calculer la quantité d'eau absorbée par les racines :

- Élève : Que l'eau va diminuer, encore plus que celle sans plante.

Professeur : Et pourquoi l'eau va diminuer dans le bocal sans plante ?

Élève : Il y a une évaporation, aussi.

Répondre à ces questions conduit à préciser l'interprétation de l'expérience mais aussi à construire le sens des objets mathématiques en jeu au niveau 3 de questionnement de notre modèle. Le mode de représentation peut à la fois porter sur les mesures et sur les accroissements. La soustraction, outil de calcul, permet de donner du sens à la différence, à partir du recueil des résultats de l'expérience et en s'appuyant directement sur l'investigation.

Toujours dans cette même classe de CM2, une autre question mathématique aurait pu être abordée en prenant en compte la variabilité du vivant. Après avoir fait germer un certain nombre de graines, les plantules exposées aux mêmes conditions se développent de façons différentes.

Comment alors comparer deux échantillons lorsqu'une des conditions diffère ? Une réflexion sur la grandeur moyenne, mais aussi sur la dispersion des résultats peut être abordée dans une perspective à long terme de gestion des données et d'analyse statistique d'une situation. La représentation des données est un bon outil pour faire une première approche de la comparaison de résultats obtenus sous des conditions différentes. Ainsi, au niveau de « révélation », l'investigation en sciences fait apparaître des questionnements dont la réponse dépend du développement d'un concept mathématique.

Ces exemples montrent qu'il est souvent possible d'investir à des niveaux différents les connaissances mathématiques des élèves et de les faire entrer dans une véritable co-disciplinarité dans laquelle les mathématiques sont des outils dont le développement peut s'appuyer sur les investigations mises en œuvre en sciences.

Conclusion

L'étude du vivant à l'école primaire pose des problèmes méthodologiques qui mobili-

sent des concepts mathématiques relevant directement du programme d'enseignement de mathématiques de l'école, ou abordés dans des niveaux d'enseignements supérieurs (collège, lycée). Ainsi, les activités mathématiques associées aux démarches d'investigation sur le vivant donnent lieu à différents niveaux d'investissement des savoirs par la classe : *utilisation* de savoirs mathématiques naturalisés, *approfondissement* par manipulation de connaissances en voie de naturalisation, *construction* de sens à propos d'une notion en cours d'apprentissage, *questionnement* d'un savoir mathématique par son utilisation dans un contexte scientifique ou *révélation* d'un nouveau concept dont le problème méthodologique engendre la nécessité. Les exemples d'investigations scientifiques à l'école primaire présentés dans cet article montrent qu'il est possible de mobiliser les savoirs mathématiques en jeu aux niveaux de *construction*, de *questionnement* ou de *révélation*, qui donnent du sens aux concepts travaillés.

Une même démarche peut ainsi être productrice de sens non seulement en sciences, mais aussi en mathématiques, chaque discipline trouvant dans l'étude d'un objet partagé, l'occasion de donner à apprendre, dans une approche co-disciplinaire. Le terme co-disciplinarité a été proposé initialement par Blanchard-Laville (2000), dans le cadre des recherches en sciences de l'éducation, pour décrire des regards croisés et complémentaires sur des objets étudiés, en favorisant la synergie entre les disciplines. Il a été repris par Chevallard (2004) pour caractériser des démarches d'apprentissage qui respectent et articulent les positions épistémologiques de plusieurs disciplines (Chevallard 2004). Nous pensons que l'approche co-disciplinaire peut permettre d'engager les élèves dans la résolution de problèmes complexes, en particulier dans le cas des démarches expérimentales, pour nourrir à la fois les apprentis-

sages en sciences et mathématiques. Certaines ressources produites dans le cadre du projet *Culture scientifique et numérique et égalité des chances* relèvent de cette approche.

A l'école primaire, c'est le même enseignant qui a la responsabilité de l'enseignement des sciences et des mathématiques, et les démarches co-disciplinaires peuvent être menées dans le quotidien de la classe. Au collège et au lycée, où ces disciplines sont enseignées par différents professeurs, les démarches co-disciplinaires, qui restent pertinentes, peuvent prendre place dans le cadre filières spécifiques (SEGPA), ou de dispositifs particuliers tels que les thèmes de convergence, les itinéraires de découverte (IDD), les enseignements d'exploration tels que méthodes et pratiques scientifiques (MPS), ou les travaux personnels encadrés (TPE). Dans le cadre de notre projet, la modélisation a été abordée en codisciplinarité entre mathématiques et sciences physiques, pour la classe de SEGPA (Aldon et Bécu-Robinault, 2013 a et b). La modélisation est en effet un élément des démarches d'investi-

gation particulièrement propice à l'approche codisciplinaire et à la construction de sens en mathématiques⁵ (Prieur et Aldon, 2011). La conception de protocoles expérimentaux prenant en charge la variabilité interindividuelle, et le traitement statistiques de données issues de l'expérience sont aussi des occasions particulièrement fertiles pour la codisciplinarité mathématiques - sciences de la vie. Nous les avons envisagés en 1^oS dans le cadre de l'analyse d'images cérébrales obtenue par IRM (Monod-Ansaldi et al, 2012a), ou pour l'étude du temps de réaction à un stimulus visuel⁶ ou de reconnaissance de mots⁷ (Monod-Ansaldi et al, 2012b). Dans l'enseignement secondaire, la codisciplinarité implique la collaboration entre professeurs, elle nécessite le développement de collectifs enseignants (Aldon, Monod-Ansaldi et Prieur, 2012), et l'explicitation des concepts épistémologiques mis en jeu dans les démarches scientifiques au niveau de chacune des disciplines (Prieur, Monod-Ansaldi, 2013), pour pouvoir se comprendre et articuler différentes approches complémentaires autour d'un même objet.

5 Différentes ressources pour de telles démarches en classe de seconde ont été élaborées dans le cadre d'un enseignement expérimental de pratiques scientifiques en classe de seconde

<http://eductice.ens-lyon.fr/EducTice/recherche/dies/p2s/demarche-dinvestigation>

6 <http://aces.ens-lyon.fr/aces/ressources/neurosciences/temps-de-reaction-investigation-variabilite-et-traitements-statistiques-des-donnees/enseigner-1/>

7 <http://eductice.ens-lyon.fr/EducTice/recherche/dies/statistique-et-biologie/lecture-et-mesure-de-temps-de-reconnaissance-des-mots/>

Références bibliographiques

Aldon G. & Bécu-Robinault K. (2013) Modélisation maths-Physique : un exemple en classe de SEGPA, in Frégné, P., Vandebrouck, F. (Eds) *La réforme des programmes de lycée, et alors ?*, Actes du séminaire inter-IREM Université, Lyon 24-25 mai 2013.

Aldon G. & Bécu-Robinault K. (2013) Élaboration de règles d'utilisation de représentations par des élèves de SEGPA lors d'activités de modélisations des états de l'eau. *Recherche en didactique des sciences et des technologies*, 8 : 23-46.

Aldon, G., Monod-Ansaldi, R. & Prieur, M. (2012) Les conditions d'un travail collaboratif codisciplinaire pour la mise en œuvre de DI au lycée. *Colloque international CREAD, Formes d'éducation et processus d'émancipation*, IUFM de Bretagne, Rennes, mai 2012.

http://esup.bretagne.iufm.fr/colloque_cread_2012/paper_submission/Grangeat.pdf

Blanchard-Laville, C. (2000) De la co-disciplinarité en sciences de l'éducation. *Revue Française de Pédagogie*, 132, p 55-66.

Canguilhem, G. (1965). *La connaissance de la vie*. Paris : Vrin (2e éd. 1980).

Chevalard, Y. (2004). Vers une didactique de la codisciplinarité - Notes sur une nouvelle épistémologie scolaire. Communication aux Journées de didactique comparée 2004 (Lyon, 3-4 mai 2004). Version retouchée du 19 mai 2004. Disponible sur Internet :

<http://yves.chevallard.free.fr/spip/spip/recherche.php3?recherche=codisciplinarit%E9> (consulté le 24 octobre 2013).

Coquidé, M., Bourgeois-Victor, P. & Desbeaux-Salviat, B. (1999). «Résistance du réel» dans les pratiques expérimentales. *Aster*, 28 : 57-78.

Coquidé, M. (2000). Le rapport expérimental au vivant. Mémoire d'Habilitation à diriger des recherches. Université Paris Sud, juin 2000.

Darley, B. (2007). La démarche d'investigation et son vocabulaire. *Grand N*, 79, 99-111.

Monod-Ansaldi R., Molinatti, G., Fontanieu V., Devallois, D. & Sanchez, E. (2012a). Tests statistiques et IRM cérébrales en classe de première S. *RDST*, 5, 159-184.

Monod-Ansaldi, R., Cordier, F., Fontanieu, V. & Daubias, P. (2012b). Outiller l'approche statistique des résultats en SVT : retour d'une expérimentation sur les temps de reconnaissance de mots en 1°S. in R. Nkambou, C. Narce, S.A. Cerri, P. Boiron, C. Paliard (Dir.), *Intégration Technologique et Nouvelles Perspectives d'Usage, Actes du 8ème Colloque Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement, TICE 2012*, 277-283.

<http://gdac.uqam.ca/tice2012/ActesTICE2012-Final.pdf>

Prieur, M., & Monod-Ansaldi, R. (2013). *Evaluer les démarches d'investigation : expliciter entre les disciplines les concepts structurant de ces démarches*. Symposium *Démarche d'investigation, compétences et évaluation : ce que des recherches disent des changements préconisés dans l'enseignement des sciences au collège*. Paper presented at the Colloque AREF, Montpellier.

Prieur, M. Aldon, G., (2011) *Un enseignement scientifique co-disciplinaire pour traiter la question de la modélisation*, Repères-IREM, 82, 23-36

Wang, F., Hannafin, M.J. (2005). Design-based research and technology-enhanced learning environments, *Educational Technology Research and Development*, n°4, 5-23