

La théorie de l'arc-en-ciel d'al-Fârisî

Une séquence du projet *Les découvertes en pays d'Islam*

Résumé

Par des activités d'observation, les élèves découvrent qu'un arc-en-ciel n'est visible que dans certaines conditions d'observation et qu'il existe des points communs entre chaque arc-en-ciel, des invariants. À la suite d'al-Fârisî, ils sont amenés à explorer les conditions d'observation de l'arc-en-ciel. Ils découvrent ainsi les positions respectives de la source de lumière et de l'eau par rapport à eux-mêmes. Ils constatent également que les couleurs extrêmes de l'arc-en-ciel sont toujours les mêmes. Cette séquence est aussi l'occasion de rompre avec certaines idées présentes chez les enfants : l'arc-en-ciel n'est pas un objet matériel, il n'est pas davantage constitué de sept couleurs. Ces activités de découverte les conduisent enfin à s'intéresser à quelques aspects de la physique des couleurs.

L'arc-en-ciel

La théorie de l'arc-en-ciel <i>Bernard Maitte</i>	48
La lumière et l'eau : à la découverte de l'arc-en-ciel avec al-Fârisî <i>Cécile de Hosson, avec la collaboration de Xavier Delaville</i>	55
Texte pour enfants <i>Anne Fauche</i>	64

La théorie de l'arc-en-ciel

Le soleil. Il succède à la pluie, qui tombe encore là-bas, un peu plus loin. Les arbres s'ébrouent. Dans les nuées : un arc-en-ciel. Il est là, fidèle aux gouttes d'eau et à la lumière mêlées, après l'orage, dans les fontaines, sous les rames des bateaux. Un arc de cercle. À l'opposé du soleil. Le rouge à l'extérieur, le bleu à l'intérieur, au centre le jaune. Parfois un second arc, au-dessus, moins intense, ses couleurs sont inversées : le bleu en dehors, le rouge en dedans. Les arcs sont hauts dans le ciel à l'aurore, au couchant : presque un demi-cercle sur l'horizon. Ils sont bas à midi, invisibles en ville ou près des tropiques. En montagne, en avion, le sol n'est pas là pour les limiter : ils peuvent être outrepassés, plus grands qu'un demi-cercle. Un examen attentif le montre : le centre des arcs-en-ciel est toujours à l'opposé du soleil par rapport à l'observateur. Mille personnes le regardent, mille pieds de l'arc existent : un pour chaque spectateur. Inutile de creuser pour trouver un trésor. Toujours le rouge fait le même angle avec la droite soleil-œil-centre du « météore », comme on l'appelle depuis Aristote, parce qu'il se déploie dans l'air. Les autres couleurs ont elles aussi leur angle propre, constant.

L'apparition de ce splendide phénomène a donné lieu à de nombreux mythes : les Arabes savent que les Grecs en font la trace de la déesse Iris, messagère aux pieds ailés, qui apporte aux dieux les ordres de Zeus, aux hommes les présages. Ils lisent dans la Bible, que l'arc-en-ciel apparaît à Noé à la fin du Déluge, signe de l'alliance entre Dieu et les hommes. Le météore intervient aussi dans l'Apocalypse de Jean : c'est sur lui qu'est assis le Christ lors du Jugement dernier. Dans toutes les interprétations, l'arc

représente très souvent un couple principal : soleil-eau, terre-ciel, dieu-homme, masculin-féminin.

C'est Aristote (IV^e siècle) qui donne la première explication scientifique du phénomène. Il distingue l'explication des couleurs, qui relèvent de la « physis » (physique, physiologie, psychologie), et celle de la forme, qui est un problème de géométrie. Les couleurs : il considère (à tort démontrera-t-on deux mille ans plus tard) que le blanc est pur, homogène, tandis que les couleurs sont des mélanges, des « atténuations » de la vue. Les couleurs de l'arc-en-ciel seraient des réflexions sur un nuage. Un miroir de grande taille réfléchit la forme et la couleur (votre figure et la couleur de la peau). Un morceau de faibles dimensions ne renvoie que la couleur (celle de votre peau, vous ne voyez plus votre face entière). Comme le météore présente des couleurs continues et pas d'image, elles sont dues à la réflexion sur de petits miroirs. Ces miroirs sont constitués par les gouttes d'eau formant le nuage. La forme : l'œil émet des rayons visuels. Ils s'atténuent avec la distance parcourue. Chaque couleur correspond à une atténuation particulière du blanc. Une même couleur se peint à même distance de l'œil, donc en un lieu géométrique qui est un cercle. Celui-ci a son centre à l'opposé du soleil par rapport à l'œil, puisque le nuage nous renvoie des rayons réfléchis. L'importance de la philosophie d'Aristote fera que sa conception de l'arc-en-ciel sera étudiée par tous ses successeurs, dans la science en pays d'Islam en particulier.

Un des commentateurs d'Aristote, Alexandre d'Aphrodise, vers 200, remarque et décrit un phénomène que personne avant lui n'a souligné : la bande de ciel comprise entre les deux arcs est toujours sombre. À quoi est due cette relative obscurité, la « bande d'Alexandre », comme on la nomme depuis ? La science développée en pays d'Islam va répondre à cette question et remettre profondément en cause l'explication d'Aristote.

Le plus grand des physiciens arabes est, sans conteste, Ibn al-Haytham (Alhazen) (965-1041). Il est le premier à s'intéresser à la nature physique de la lumière (voir « Le rayon lumineux »), qu'il suppose composée de petits corpuscules analogues à des sphères. Il justifie cette hypothèse et explique tous les faits lumineux qu'il connaît en mettant au point la méthode expérimentale. Il étudie ainsi les « sphères ardentes », des sphères de verre

Les Découvertes en pays d'Islam

qui concentrent les rayons lumineux et peuvent enflammer, comme le font une lentille de verre, une loupe... Grâce à une expérimentation précise effectuée au moyen d'une chambre noire, il peut tracer les rayons qui entrent, se réfractent (sont déviés en traversant le verre), ressortent de ces sphères (voir la figure 1). Il démontre alors (voir la figure 2) que les rayons parallèles venant du soleil et qui tombent sur une sphère font des angles d'incidence différents, qu'ils se réfractent et ressortent dans l'air toujours selon des angles compris entre 0° et une valeur limite (selon l'arc O'G de la figure 2) : aucun rayon ne peut sortir à l'extérieur de G. Nous verrons l'importance de ce résultat. En ce qui concerne l'arc-en-ciel, Ibn al-Haytham innove peu par rapport à Aristote. Il remplace, et c'est beaucoup, le « rayon visuel » par le « rayon lumineux » provenant du soleil mais ne donne aucune explication tirée de sa méthode expérimentale ou des résultats qu'il obtient en optique. À l'époque où vivait Ibn al-Haytham, Ibn Sinâ (Avicenne) avait eu l'idée d'expliquer l'arc-en-ciel non plus par la réflexion sur de petits miroirs situés dans les nuages, comme Aristote, mais par la réflexion sur les gouttes de pluie. Cette idée importante ne va pas, dans l'état actuel de nos connaissances, être reprise avant les travaux de Kamâl al-Dîn al-Fârisî (1266-1319). Il mène ceux-ci à l'instigation de son maître, Qutb al-Dîn ash-Shirâzî (mort en 1311), astronome à l'observatoire de Maragha, qui lui enseigne l'optique à Tabriz et lui apporte du Caire, pour le commenter, l'exemplaire original du *Livre de l'optique* d'Ibn al-Haytham, écrit de la main de son auteur.

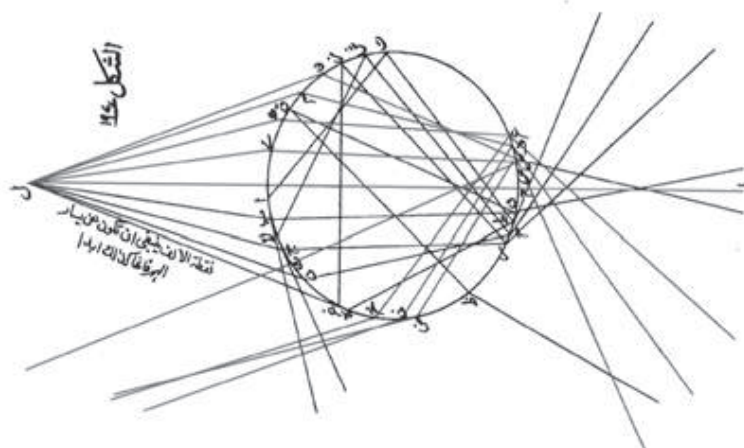


Figure 1 : Trajets de la lumière dans une sphère de verre selon Ibn al-Haytham

Pour modifier la conception de l'arc-en-ciel, al-Fârisî va, bien sûr, s'appuyer sur la révision qu'il fait de l'optique d'Ibn al-Haytham, sur les idées aussi d'Ibn Sinâ (la lumière se réfléchit sur les gouttes de pluie et non sur les gouttes formant un nuage) et sur celles d'ash-Shirâzî (la lumière se réfracte dans les gouttes de pluie puis se réfléchit sur la face arrière de celles-ci, mais il ne démontre pas cette proposition et confie ce travail à son élève). En ce qui concerne la géométrie du météore, al-Fârisî reprend le schéma du trajet des rayons lumineux dans la sphère ardente réalisé par Ibn al-Haytham et identifie chaque goutte de pluie à une telle sphère. Mais, alors que son illustre prédécesseur s'intéressait à tous les rayons lumineux pouvant ressortir de la sphère, al-Fârisî ne s'occupe que des rayons pouvant ressortir en direction de l'œil d'un observateur placé entre le soleil et la pluie. Il démontre ainsi que des rayons entrant dans la goutte, se réfléchissant sur sa face arrière et ressortant par l'avant peuvent converger vers l'œil du spectateur (voir la figure 3 page suivante). Il en est de même, avec un angle différent, pour d'autres rayons entrant dans les gouttes d'eau, se réfléchissant deux fois sur la face arrière et ressortant par la face avant (voir la figure 3). Al-Fârisî se trompe un peu sur la valeur des angles : ici il n'expérimente pas lui-même mais reprend les valeurs déterminées par Ibn al-Haytham grâce à la sphère ardente de verre, alors qu'il aurait dû prendre des valeurs déterminées sur des sphères emplies d'eau (indice de réfraction différent).

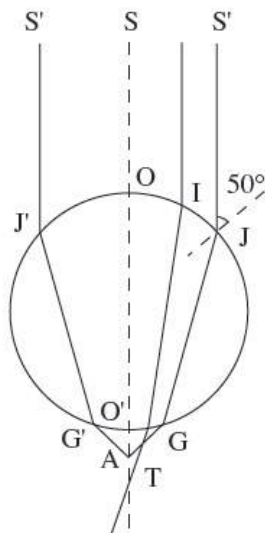


Figure 2 a

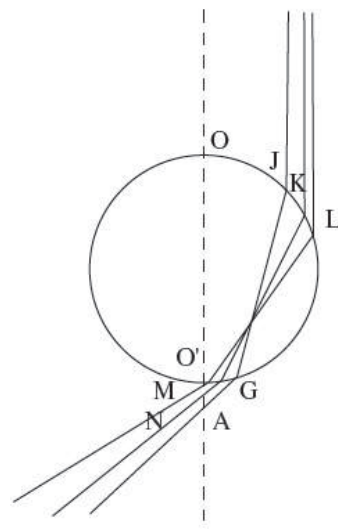


Figure 2 b

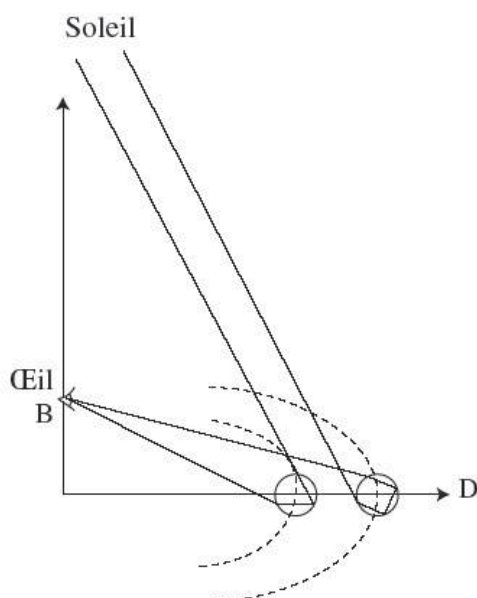


Figure 3 : Arc-en-ciel selon al-Fârisî

Pour expliquer les couleurs, al-Fârisî observe les irisations que présentent les gouttes de rosée ou l'eau contenue dans des récipients placés au soleil. D'évidence, ces couleurs ne sont pas dues à des éloignements différents, à des « affaiblissements » de la vue comme le supposait Aristote, mais aux phénomènes de réfraction. Reprenant alors les tracés géométriques d'Ibn al-Haytham, il s'aperçoit que les rayons parallèles incidents donnent des cônes

réfractés qui peuvent se croiser et se renforcer plus ou moins en un même point (cônes tels que JG, J'G', GTG', LM, J'G', LM' de la figure 2). Pour lui, il y a quatre couleurs dans l'arc-en-ciel : le bleu, le vert, le jaune et le rouge. Le bleu serait dû au rapprochement sans superposition des cônes, le vert à des superpositions partielles de ces cônes, le jaune à des superpositions totales, le rouge apparaissant au bord du faisceau, plus lumineux...

Pourquoi les couleurs des deux arcs sont-elles inversées et celles du second plus sombres ? Al-Fârisî remarque qu'une réflexion inverse l'image. Le premier arc-en-ciel est associé à une réflexion à l'arrière des gouttes de pluie, le second à deux réflexions : les couleurs de l'un sont donc inversées par rapport à l'autre. Une réflexion fait perdre de la lumière : l'arc supérieur est donc moins intense. Et pourquoi la bande d'Alexandre ? Ibn al-Haytham a démontré (voir la figure 2) qu'aucun rayon ne peut sortir à l'extérieur de OG'. C'est la limite du rouge, extérieur au premier arc, intérieur au second : entre les deux, il n'y a pas de lumière transmise par les gouttes de pluie, le ciel est plus sombre. Pourquoi l'arc-en-ciel est-il parfois incomplet ? Il marque l'intersection entre la zone où il pleut et celle qui est éclairée par les rayons solaires. Pourquoi voit-on des couleurs continues alors que les gouttes de pluie sont discontinues ? Celles-ci sont très nombreuses et, de loin, nous ne pouvons distinguer les discontinuités, mouvantes.

L'explication de l'arc-en-ciel est complète dans le cadre d'une conception générale et cohérente du monde, en accord général avec la vision du monde d'Aristote, mais considérablement enrichie par l'introduction d'un nouvel objet physique – la lumière – et l'adoption de la méthode expérimentale. Pour la proposer, al-Fârisî vient d'interpréter des expériences effectuées non sur des gouttes de pluie, impossibles à isoler et à étudier, mais sur une sphère de verre emplie d'eau. Ibn al-Haytham avait eu recours à des montages lui permettant d'assurer le contrôle technique des propositions de la géométrie (la géométrie et l'optique d'Euclide considéraient des droites et leurs trajets, Ibn al-Haytham leur substitue des rayons lumineux rectilignes, qui se réfléchissent et se réfractent) ; il avait assimilé la réflexion et la réfraction de la lumière au comportement de sphères dures lancées à grande vitesse dont il avait mathématisé le mouvement. Al-Fârisî ajoute à ces deux catégories de la preuve une troisième : il remplace un objet naturel impossible à étudier séparément (les gouttes de pluie) par un objet fabriqué, un « modèle analogique » (la sphère emplie d'eau), et confère aux correspondances établies un statut mathématique.

Ces innovations, promises à un bel avenir, ne vont pas, dans l'état actuel de nos connaissances, se développer en pays d'Islam : à l'époque où vit al-Fârisî les circuits traditionnels d'échanges scientifiques se désorganisent : l'Empire ottoman se constitue (1291), la circulation des écrits ne se produit plus entre l'Orient et l'Occident musulmans, celui-ci entre en déclin. Les pays latins s'étaient appropriés à partir de la fin du ^x^e siècle la science constituée en pays d'Islam. Leurs traducteurs avaient mis à disposition l'œuvre d'Ibn al-Haytham – sauf l'introduction parlant explicitement de la méthode expérimentale. Grâce aux écrits de ce maître, les explications de l'arc-en-ciel vont se développer en Chrétienté avec Roger Bacon (1267), Witelo (1278), Dietrich de Freiberg. Celui-ci va aboutir lui aussi, à peu près la même année qu'al-Fârisî, à l'explication complète de l'arc-en-ciel, mais avec moins de précision et en suivant une démarche empreinte de mystique, bien différente donc de la pratique scientifique des pays d'Islam, qui a toujours été profane.

La philosophie du Moyen Âge entrera elle aussi en déclin. Les explications d'al-Fârisî et de Dietrich de Freiberg seront oubliées lors de

Les Découvertes en pays d'Islam

la constitution de la « science moderne », celle des mécènes au xvii^e siècle, Ibn al-Haytham restant cependant bien connu et présent dans les livres savants de cette époque. C'est René Descartes qui, dans son *Discours de la Méthode, plus la Dioptrique, plus les Météores, plus la Géométrie qui sont des applications de cette Méthode* (1647), retrouvera, grâce à la loi de la réfraction de Snell, qu'il est le premier à publier, l'explication géométrique complète de l'arc-en-ciel, dépassant en précision celle d'al-Fârisî. C'est Isaac Newton (1672) qui quantifiera complètement l'arc et les couleurs, faisant du blanc un mélange hétérogène et distinguant sept couleurs fondamentales, comme il y a sept notes de musique et sept planètes... Le chiffre 7 représentera pour lui la cohérence et la Création. Au xviii^e siècle, d'autres caractéristiques de l'arc-en-ciel seront observées : des franges colorées peuvent apparaître à l'intérieur du premier arc et à l'extérieur du second, le météore envoie de la lumière polarisée... Non expliquées par la physique newtonienne, elles amèneront bien d'autres développements... Mais ceci est une autre histoire, qui a pu se développer parce que, ici comme ailleurs, la science en pays d'Islam avait fondé le socle sur lequel s'est développée notre science.

Pour en savoir plus

Bernard Maitte, *Histoire de l'arc-en-ciel*, Paris, Seuil, coll. « Science ouverte », 2005.

La lumière et l'eau : à la découverte de l'arc-en-ciel avec al-Fârisî

Objectifs :

La lumière blanche est constituée d'une infinité de couleurs.

Les gouttes de pluie décomposent la lumière blanche. Pour observer un arc-en-ciel, un observateur doit être dos au soleil et face à la pluie.

Les lumières colorées ne se comportent pas comme les pigments colorés (la peinture).

Référence au programme :

« Le ciel et la Terre : lumière et ombre ».

Matériel utilisé :

Verres à pied remplis d'eau, lampes torches, spots de couleur (rouge, vert et bleu).

L'approche que nous privilégions ici se veut plutôt empirique, tournée vers l'observation et l'expérimentation. Nous verrons par exemple qu'un arc-en-ciel n'est visible que dans certaines conditions d'observation et qu'il existe des points communs entre chaque arc-en-ciel, des invariants. À la suite d'al-Fârisî, les élèves seront amenés à explorer les conditions d'observation de l'arc-en-ciel. Ils découvriront ainsi les positions respectives de la source de lumière et de l'eau par rapport à eux-mêmes. Ils constateront également que les couleurs extrêmes de l'arc-en-ciel sont toujours les mêmes. Cette séquence sera aussi l'occasion de rompre avec certaines idées présentes chez

les enfants : l'arc-en-ciel n'est pas un objet matériel, il n'est pas davantage constitué de sept couleurs. Ces activités de découverte nous conduiront, enfin, à nous intéresser à quelques aspects de la physique des couleurs.

Pour le maître

La couleur est une sensation subjective qui résulte d'une interprétation cérébrale de la lumière reçue par la rétine de l'œil. Il n'existe donc pas de couleur « en soi » : c'est une réponse du cerveau à une excitation des cellules photoréceptrices de l'œil (les cônes situés dans la rétine) par la lumière. Cette excitation donne naissance à un signal nerveux transmis au cerveau *via* le nerf optique. Pour comprendre la couleur, il nous faut donc revenir sur le mécanisme physiologique de la vision. Cette approche vient compléter celle que nous avons présentée dans la partie consacrée à l'interprétation physique de la vision chez Ibn al-Haytham.

Considérons la lumière comme une onde. Une onde un peu particulière, certes, mais une onde quand même. On l'appelle « onde électromagnétique ». Elle est caractérisée par sa longueur d'onde que l'on mesure en nanomètres ($1 \text{ nm} = 0,000\,000\,001 \text{ m}$) ou, ce qui revient au même, par sa fréquence, mesurée en hertz. Notre œil (ou plus exactement ses cellules photoréceptrices) est sensible à des ondes électromagnétiques dont les fréquences sont comprises entre $7,5 \cdot 10^{14}$ et $4 \cdot 10^{14}$ Hz. Autrement dit, les cellules photoréceptrices envoient un signal au cerveau dès qu'elles sont atteintes par des ondes électromagnétiques dont les longueurs d'onde varient entre 400 et 750 nm. On appelle l'ensemble de ces ondes, cette lumière, la « lumière visible », en ce sens qu'elle provoque la vision (n'oubliez pas que la lumière est invisible !). L'interprétation cérébrale en termes de « couleur » de la lumière reçue dépend de la longueur d'onde (ou de la gamme de longueurs d'onde) reçue. Ainsi, à chaque longueur d'onde est associée une couleur. Par exemple, la couleur violette est une sensation répondant à l'excitation des cellules photoréceptrices de l'œil par une lumière dont la longueur d'onde est comprise entre 400 et 450 nm. Lorsque l'œil reçoit une lumière de longueur d'onde unique, on parle de « lumière monochromatique », mais ce n'est pratiquement jamais le cas...

Le spectre de la lumière blanche est découpé de façon simplifiée en *trois bandes* correspondant aux couleurs rouge, vert et bleu appelées couleurs *fondamentales*.

L'homme a la faculté de distinguer un très grand nombre de couleurs (près de un million). Pourtant, la rétine ne possède pas autant de types de photorécepteurs qu'il y a de couleurs identifiables par l'homme. En fait, il existe trois types de cônes que nous appellerons b, v et r) respectivement sensibles à la lumière dont les longueurs d'onde sont comprises :

- entre 400 et 500 nm ;
- entre 500 et 550 nm ;
- entre 550 et 750 nm.

La proportion des cônes excités et la superposition des signaux émanant des différents cônes permettent, par synthèse additive, la vision de toutes les couleurs.

Il ne s'agit pas bien sûr de traiter tout cela avec des élèves de primaire. Mais cette mise au point théorique vous permettra sans doute de prêter une attention toute particulière à l'idée largement partagée selon laquelle couleur et matière colorée sont une seule et même chose. Ainsi, le caractère matériel que les élèves attribuent spontanément à la couleur s'oppose-t-il au caractère abstrait de la sensation de couleur produite par la lumière. Cela étant posé, entrons maintenant dans l'univers fascinant des lumières et des objets colorés.

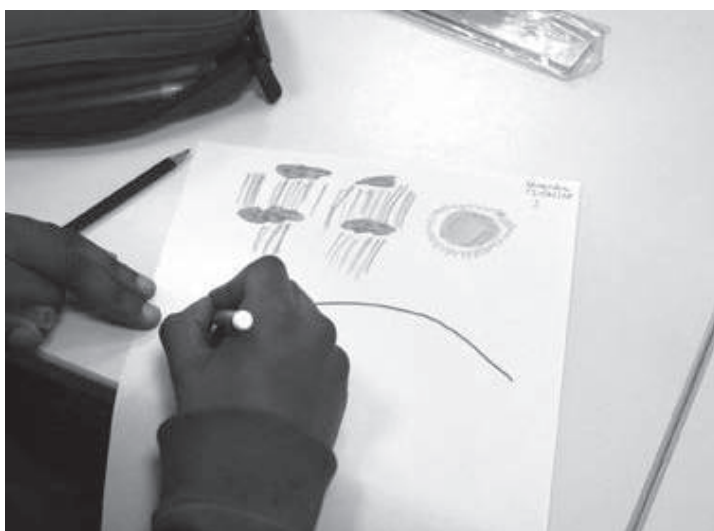
Activité n° 1 : Les idées des élèves à propos de l'arc-en-ciel

Il s'agit ici de caractériser la façon dont les élèves comprennent et expliquent spontanément la formation d'un arc-en-ciel. Cette étape va orienter les séances qui suivront. La consigne proposée par le maître, « Représenter un arc-en-ciel de façon à ce qu'une autre personne puisse comprendre comment il se forme », est écrite au tableau. Les élèves y répondent de façon individuelle.

L'examen des productions des élèves soulève plusieurs questions relatives aux couleurs (combien y en a-t-il ? dans quel ordre se trouvent-elles ? cet ordre est-il toujours le même ?), à la chronologie des événements (faut-il que le soleil et la pluie soient présents en même temps, ou faut-il attendre qu'il ait

Les Découvertes en pays d'Islam

plu pour qu'apparaisse l'arc-en-ciel), aux positions respectives des éléments nécessaires à la formation de l'arc. Ces questions sont examinées lors d'un débat organisé par le maître. Pour chaque thématique retenue (couleurs dans l'arc, chronologie des événements, position du soleil, de la pluie), le maître affiche des dessins contradictoires au tableau et demande aux élèves de discuter la pertinence de ces dessins (voir la photo ci-dessous). Les élèves pensent que seule compte la présence de soleil et de pluie. Ils n'accordent aucune importance à la position du soleil dans le ciel. En revanche, ils débattent vivement de la position de la pluie par rapport à l'arc : est-elle « dedans », « derrière » ? Concernant le mécanisme général de formation de l'arc-en-ciel, les élèves s'entendent pour dire que « c'est la lumière du soleil qui vient se mettre dans l'eau, et cela forme les couleurs ». Signalons que l'observateur n'est jamais dessiné spontanément par les élèves.



Dessin d'élèves de cycle 3 (CM2) en réponse à la consigne : « Dessine un arc-en-ciel. Une autre personne doit comprendre, grâce à ton dessin, comment il se forme. » Certains dessins présentent des événements qui s'enchaînent dans le temps. Cette position fait l'objet d'une discussion : la moitié des élèves de la classe affirment que la présence de pluie et de soleil doit être simultanée, comme l'illustre ce dessin.

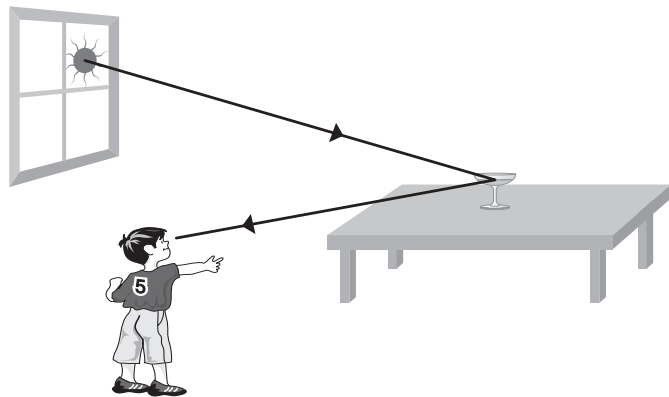
L'intervention du maître et la lecture du texte pour enfants permettent de répondre à certaines questions, notamment à celle concernant le nombre de couleurs : il n'y a pas sept couleurs dans l'arc-en-ciel (en général, on n'en distingue pas plus de quatre ou cinq). À la fin de la première séance,

certaines interrogations demeurent qui font écho à celles que se posent Nabil et Fadila dans le texte pour enfants. Elles sont écrites sur une affiche et définissent l'organisation des séances suivantes :

1. Quelles sont les couleurs qui délimitent l'arc-en-ciel ? Sont-elles toujours disposées de la même manière ?
2. Dans quelles conditions est-il possible de voir un arc-en-ciel ? Peut-on fabriquer un arc-en-ciel en classe ?
3. Peut-on toucher un arc-en-ciel ? Un arc-en-ciel est-il un objet matériel ?
4. Quelles hypothèses les savants ont-ils formulées pour expliquer la formation de l'arc-en-ciel à travers l'histoire ? Qu'est-ce que le savant al-Fârisî a-t-il pu dire à Fadila et Nabil avant que le secret se perde dans la nuit des temps ?

Activité n° 2 : Fabriquer un arc-en-ciel en classe

Afin de répondre aux trois premières questions listées ci-dessus, il faudrait que les élèves puissent disposer d'un arc-en-ciel. Or, ce phénomène étant assez rare dans la nature, l'enseignant invite les élèves à réfléchir à un moyen de produire les couleurs de l'arc-en-ciel en classe. Il ne fait aucun doute pour les élèves que l'eau (la pluie, en particulier) est nécessaire à la formation de l'arc-en-ciel. Il faut également du soleil. Certains suggèrent d'utiliser l'eau d'un jet dans la cour de récréation en plein soleil. Cette expérience est réalisée par beau temps. D'autres proposent de faire passer de la lumière dans l'eau d'un récipient. Les élèves sont alors regroupés par quatre et disposent d'un verre à pied rempli d'eau et d'une lampe torche. La salle de classe est obscurcie et chaque groupe s'attache à produire les couleurs de l'arc-en-ciel. Au bout de quelques minutes de recherche, ils constatent qu'il est possible d'observer un tout petit arc-en-ciel à l'intérieur de l'eau du verre.



Les Découvertes en pays d'Islam

Celui-ci n'est pas visible par tous les élèves du groupe, mais uniquement par ceux qui se trouvent dos à la lampe. L'expérience est ensuite refaite à l'aide de la lumière du soleil filtrant par les fenêtres.



Un arc-en-ciel est également visible grâce à la lumière du soleil, à condition, encore une fois, que les élèves aient le soleil dans le dos.

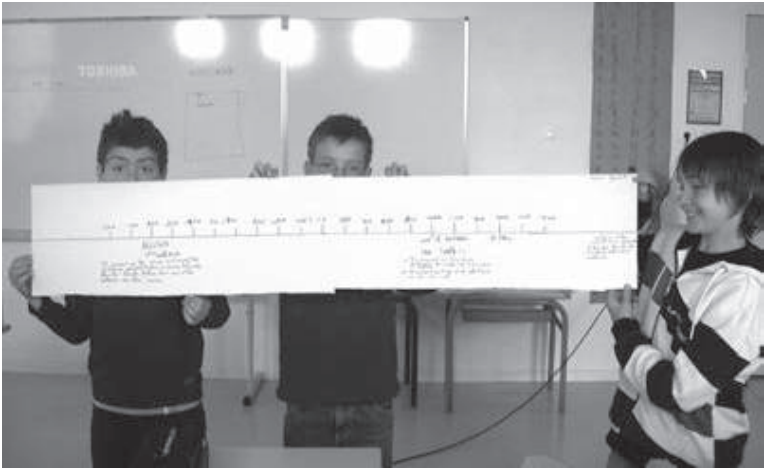
Les élèves constatent que l'ordre des couleurs est toujours le même (du violet au rouge), que l'action du soleil et de l'eau est simultanée, que l'arc-en-ciel n'est pas un objet que l'on peut prendre dans ses mains, et, surtout, que son apparition dépend de la position de l'observateur par rapport à l'eau et par rapport à la source de lumière. Reste désormais à répondre à la quatrième question : comment est-on parvenu à comprendre la formation de l'arc-en-ciel ?

Activité n° 3 : Approche historique

Le phénomène de l'arc-en-ciel a suscité de nombreuses interprétations au cours des siècles. L'animation « La théorie de l'arc-en-ciel d'al-Fârisî » présentée sur le site du projet (www.lamap.fr/decouvertes) en rappelle quelques-unes qu'il est intéressant de discuter avec les élèves. Après avoir situé dans l'espace et dans le temps (à l'aide de documents mis à disposition par le maître ou sur Internet) les différents savants dont l'animation fait mention (Aristote, Ibn Sinâ, Ibn al-Haytham et al-Fârisî), on leur demande d'associer chaque explication ou avancée conceptuelle au savant qui en est l'auteur (voir le tableau ci-dessous).

Savant cité dans l'animation	Son explication du phénomène de l'arc-en-ciel
Aristote	Des petits miroirs présents dans les nuages renvoient la lumière du soleil. Cette lumière renvoyée est impure et formée de plusieurs couleurs.
Ibn Sinâ	La pluie est nécessaire à la formation de l'arc-en-ciel.
Ibn al-Haytham	Des sphères remplies d'eau dévient la lumière du soleil.
Al-Fârisî	Un arc-en-ciel n'est visible que lorsqu'un faisceau lumineux provenant du soleil et pénétrant dans une goutte de pluie pénètre dans l'œil d'un observateur. Pour cela, l'observateur doit être face à la pluie et dos au soleil.

Ce travail documentaire, assisté de l'animation, donne lieu à la production d'une frise chronologique : « Contribution des savants de langue arabe à l'explication de l'arc-en-ciel ».



Les explications proposées par Aristote, Ibn Sinâ, Ibn al-Haytham et al-Fârisî sont placées sur une frise chronologique réalisée par les élèves à l'issue du visionnage de l'animation et de l'activité documentaire qui l'accompagne.

Mais certaines questions restent en suspens, notamment celle de la présence des couleurs. À ce stade, les gouttes d'eau restent dotées d'un pouvoir mystérieux, sortes de boîtes noires, capables de révéler la palette infinie des couleurs qui composent la lumière du soleil. Il faudra en effet attendre le ^{xvii}e siècle et les travaux d'Isaac Newton pour en comprendre l'origine. Même si la question de l'origine des couleurs de l'arc-en-ciel n'est pas abordée ici, il apparaît tout à fait possible d'envisager des activités visant à familiariser les élèves avec certaines notions relatives à la physique de la lumière blanche et à la vision des lumières colorées. Ce faisant, nous conduirons les élèves à distinguer le comportement de la matière colorée (et notamment les mélanges de pigments qui leur sont familiers) et celui de la lumière colorée.

Activité n° 4 : Additionner les lumières colorées

1. Produire et voir des couleurs avec des mélanges de lumières colorées

Les situations proposées maintenant ont pour but de créer un conflit entre ce que les élèves s'attendent à voir et ce qu'ils observeront en effet. Cette déstabilisation vise à les doter d'une nouvelle approche de la couleur, différente de celles qu'ils ont acquises en art visuel par exemple, lorsqu'ils ont mélangé certaines peintures pour en obtenir de nouvelles.

Chaque groupe d'élèves dispose de trois sources de lumière de différentes couleurs : une source rouge, une verte et une bleue. On leur demande quelles couleurs ils peuvent fabriquer avec toutes ces sources. Leurs réponses sont fortement influencées par la confusion entre les mélanges de peintures et les mélanges de lumières colorées. Certains élèves prévoient, par exemple, qu'ils vont obtenir du « marron en mélangeant du vert et du rouge, ou en mélangeant les trois lumières ». Toutefois, l'expérimentation les conduit à dissocier les deux phénomènes. L'association la plus surprenante est sans doute l'addition du faisceau rouge et du faisceau vert, qui produit de la lumière jaune (et non du marron, comme le mélange de rouge et de vert en peinture). L'addition lumière verte + lumière bleue = lumière cyan, et l'addition lumière rouge + lumière bleue = lumière magenta. Quant à la somme des trois faisceaux rouge, vert et bleu, elle produit de la lumière blanche.

2. Fabriquer des ombres colorées

Pour la plupart des élèves, une ombre est noire, ou grise. Cette dernière activité devrait leur permettre de comprendre qu'une ombre n'est pas un objet matériel noir et qu'elle ne se comporte pas comme une tache sombre. En fait, une ombre est une zone de moindre intensité lumineuse, elle renvoie donc peu de lumière à l'œil. Si elle est éclairée par une autre source que celle qui lui a donné naissance, elle va recevoir (et donc renvoyer) une partie de la lumière de cette autre source. Et si cette deuxième source est colorée, alors l'ombre deviendra une zone colorée comme nous allons le voir. Comprendre la formation des ombres colorées n'est possible que si l'on a parfaitement intégré le fait qu'une ombre n'est pas une chose !

Étape 1 : On demande tout d'abord aux élèves de prévoir ce qu'ils verront s'ils éclairent un objet (leur stylo, par exemple) avec une lumière rouge. Le stylo est placé verticalement sur une feuille de papier blanc. Les élèves

observent l'ombre du stylo sur la table. Celle-ci apparaît gris foncé. Elle est entourée de lumière rouge.

Étape 2 : Que se passe-t-il maintenant si l'on éclaire ce même stylo à la fois en lumière rouge et en lumière verte (les deux sources étant placées l'une à côté de l'autre) ? Que verra-t-on sur la feuille de papier ? Pourquoi ? Certains élèves prévoient qu'ils vont obtenir deux ombres entourées de lumière jaune, résultat de l'addition des lumières verte et rouge. Mais aucun d'entre eux n' imagine que les ombres obtenues puissent être colorées, ce qui est pourtant le cas comme l'atteste la vérification expérimentale : l'ombre précédente est éclairée en lumière verte et renvoie donc cette lumière verte vers les yeux de l'observateur qui voit... une ombre verte. Par ailleurs, le stylo intercepte une partie de la lumière verte. Il se forme une deuxième zone d'ombre éclairée cette fois-ci en lumière rouge. Les élèves observent donc deux ombres du stylo, chacune de couleur distincte, l'une rouge, l'autre verte. Autour de ces zones, les couleurs se mélangent. Lumière rouge + lumière verte = lumière jaune.

Étape 3 : Que se passe-t-il maintenant si l'on éclaire le stylo avec une source bleue et une source rouge ? Puis avec trois sources : bleue, rouge et verte ? Cette étape semble difficile pour les élèves de cycle 3. En fait, chacune des ombres formées par les trois sources lumineuses est éclairée par deux sources.

Elle renvoie donc un mélange de deux lumières colorées vers l'œil de l'observateur. On s'attend donc à voir sur l'écran trois zones circulaires magenta, jaune et cyan, entourées d'un mélange de lumières verte, bleue et rouge, soit de la lumière blanche !



L'interprétation globale de l'arc-en-ciel paraît difficilement accessible à des élèves de l'école primaire ou de collège. Pourtant, la voie ouverte par les savants de langue arabe à partir du ^xe siècle après J.-C. permet d'amorcer en classe la compréhension d'un phénomène merveilleux qui continue de fasciner la plupart des enfants.

Le jeu favori de Nabil et de sa sœur Fadila était de résoudre les énigmes qui surgissaient dès qu'ils se mettaient à observer ce qui se passait autour d'eux, ou en eux. Ils étaient d'autant plus passionnés qu'avec le temps, un peu de magie s'en mêlait, comme le jour où une immense arche flamboyante de couleurs se dressa soudain devant eux dans le ciel...

Ce jour-là, Nabil et Fadila discutaient en trotinant le long des champs sans voir que le ciel se chargeait de gros nuages noirs. Soudain surpris par la pluie, ils avaient couru se réfugier sous un grand sycomore. Plaqués contre le tronc sous l'épais feuillage, ils étaient au sec. Pourtant, Fadila ronchonnait devant ses vêtements trempés. Son frère intervint :

— Arrête de geindre, Fadila, le soleil va bientôt revenir !

— Tu crois ça ! Regarde, il pleut toujours...

Nabil fit trois pas de côté et jeta un regard furtif derrière lui. Il sourit malicieusement en lançant à sa sœur :

— Droit devant nous, oui ! Mais fais le tour du tronc et regarde derrière nous : qu'est-ce que tu vois ?

Fadila tourna en bougonnant autour de l'arbre et son regard s'illumina soudain :

— Oh, le soleil revient ! Comment peut-il pleuvoir et...

Elle fut interrompue par le grand cri que poussa Nabil :

— Reviens de ce côté, Fadila, regarde !

Dans le ciel encore pluvieux, une grande arche colorée illuminait le ciel. Fadila resta muette de surprise devant ce prodige. Nabil jubilait :

— Regarde, il y a toutes les couleurs suspendues dans le ciel !

Fadila avait retrouvé ses esprits et observait attentivement :

— Non, moi, je ne vois pas toutes les couleurs, mais seulement quatre : le rouge en haut, puis le jaune, le vert, et le bleu en bas...

— Fadila regarde mieux, tu vois bien qu'entre le rouge et le jaune il y a d'autres couleurs, et d'autres encore entre le jaune et le vert, et aussi entre le vert et le bleu. Je te parie qu'il y a au moins... douze couleurs !

Fadila, qui se sentait vraiment mieux depuis que le soleil lui chauffait le dos, s'anima soudain. Elle posa quantité de questions à la suite sans laisser à Nabil le temps de répondre :

— Qui pourrait dire lequel de nous a raison ? Et puis, comment ces couleurs peuvent-elles être suspendues dans le ciel ? Et puis, est-ce qu'elles sont toujours dans le même ordre ? Est-ce qu'il faut pour cela qu'il pleuve et fasse soleil en même temps ? Nabil, tu crois que nous pourrons un jour le savoir ?

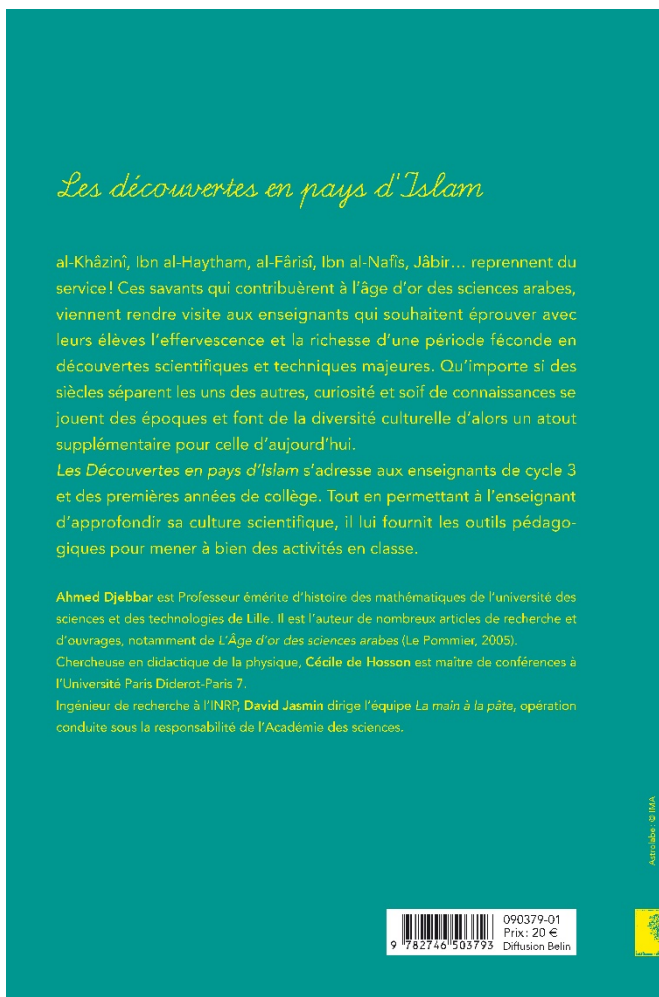
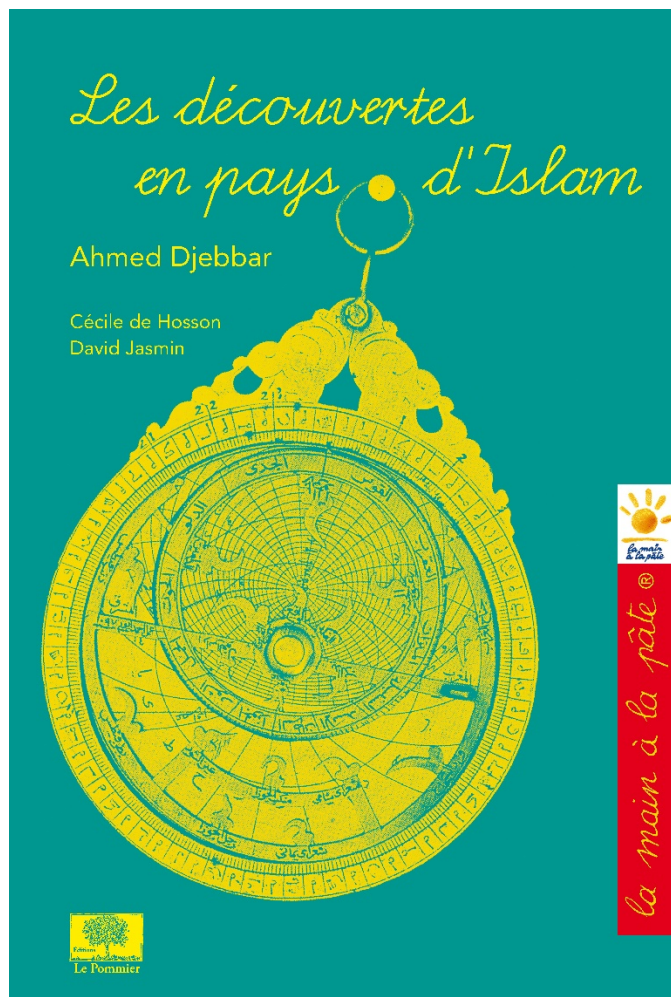
Nabil avait le regard fixé vers le ciel. Il fit soudain signe à sa sœur de se taire. Fadila leva les yeux et vit un homme au long manteau couleur de ciel et au turban couleur de nuages qui était apparu sous l'arche colorée. Il semblait lui aussi suspendu en l'air, mais il s'adressa très distinctement à Nabil et Fadila :

— Bonjour, je m'appelle Kamâl al-Dîn al-Fârisî. Il me semble que j'arrive au bon moment ! Savez-vous que de nombreux savants ont travaillé sur les couleurs de l'arc-en-ciel et que, grâce à leurs efforts et à leurs expériences, leur secret a été dévoilé ? Cela vous intéresse-t-il de le connaître ?

Devant les yeux brillants de Nabil et Fadila, il sourit silencieusement. Il sortit de son manteau des vases ronds qu'il leva vers le ciel pour les remplir de pluie et désigna un endroit bien ensoleillé près du sycomore.

La suite de ce qui se passa ce jour-là ne nous est pas parvenue, c'était il y a si longtemps, la mémoire s'est perdue ! Il n'en reste pas moins que c'est bien Kamâl al-Dîn al-Fârisî qui a réussi le premier à donner la théorie des couleurs de l'arc-en-ciel. Et d'une manière ou d'une autre, comme il a autrefois accompagné Nabil et Fadila, il accompagne aujourd'hui tous ceux et toutes celles qui se posent les mêmes questions. D'une manière ou d'une autre...

Cette ressource est issue du projet thématique *Les découvertes en pays d'Islam*, paru aux Éditions Le Pommier.



Retrouvez l'intégralité de ce projet sur : <https://www.fondation-lamap.org/projets-thematiques>.

Fondation *La main à la pâte*

43 rue de Rennes

75006 Paris

01 85 08 71 79

contact@fondation-lamap.org

Site : www.fondation-lamap.org

 FONDATION
La main à la pâte
POUR L'ÉDUCATION À LA SCIENCE