

COMMENT VARIE LA MASSE DES ŒUFS AU COURS DE L'INCUBATION ?

UN EXEMPLE DE DÉMARCHE D'INVESTIGATION DANS UNE APPROCHE INTÉGRÉE DES SCIENCES À L'ÉCOLE

Franck JAMES

Professeur des écoles, IUFM Université Bordeaux 4, Bordeaux

Cet article interroge la pertinence didactique du maître à entreprendre la mesure de la masse d'œufs de poules et à interpréter les variations qui se produisent lors d'expériences d'incubations artificielles réalisées dans des classes de cycle 3. La question traditionnellement posée à des enfants de cet âge sur le devenir du poids de l'œuf, dans des classes qui mènent ce projet de couvaison artificielle, est sous-tendue par l'objectif de mettre en évidence un des principes fondamentaux qui définit l'oviparité, à savoir que l'embryon se développe à partir des seules réserves de l'œuf, et qu'il ne bénéficie pas, pendant la phase embryonnaire, d'un apport nourricier maternel comme chez les vivipares. La prégnance de ce modèle vivipare chez les enfants s'illustre en particulier par la réponse majoritairement donnée lorsqu'on les interroge sur l'évolution de la masse des œufs : *«La masse de l'œuf augmente car la taille du poussin augmente quand il se développe correctement»*. Faire admettre un autre modèle de développement par la mise en évidence d'une absence de prise de masse pourrait donc suffire à justifier les pesées. Mais un autre problème se pose : la masse d'un œuf fécondé a-t-elle une évolution différente de celle d'un œuf non fécondé qui en ferait un critère discriminant ? Les trois professeurs des écoles impliqués dans ce travail semblent le penser alors que les données scientifiques tendent à prouver le contraire.

Dans cet article, après avoir rappelé brièvement ce que nous dit la littérature scientifique sur les transferts gazeux à travers la coquille et précisé le contexte de l'étude, nous ferons un exposé des échanges qui ont présidé à, et accompagné cette réflexion sur l'évolution de la masse des œufs dans les trois classes. Nous aborderons ainsi le contexte d'émergence du problème de la pesée et la mise en place des protocoles de mesures puis nous ferons une analyse des hypothèses émises par les élèves sur la question de la variation de la masse de l'œuf. Il nous a semblé important d'en montrer la richesse cognitive avant de faire porter

notre réflexion sur le problème de transposition didactique que pose ce travail sur l'évolution de la masse des œufs au cours de l'incubation. Ainsi, nous questionnerons dans cette seconde partie les objectifs réellement visés par les trois professeurs dans cette démarche, puis nous interrogerons la pertinence de proposer cette investigation scientifique à des élèves de cycle 3. Enfin, nous poserons la question de savoir si la conduite d'une démarche d'investigation, comme celle que nous décrivons ici, exige la maîtrise préalable des savoirs soulevés par la situation-problème.

Préambule scientifique

En toute logique, si l'œuf est considéré comme un système clos et si l'on applique le principe de conservation de la masse au cours des transformations chimiques, la masse de l'œuf au cours de l'incubation ne devrait pas varier. Or l'œuf n'est pas un système clos. La coquille est poreuse et des échanges gazeux, entrants et sortants, sont possibles. Dès lors comment peut varier la masse de l'œuf en fonction de ces échanges? D'un point de vue scientifique, quatre hypothèses sont possibles :

- La masse de gaz sortants est identique à celle qui entre => la masse de l'œuf reste invariant ;
- La masse de gaz sortants est supérieure à celle qui entre => la masse de l'œuf diminue ;
- La masse de gaz sortants est inférieure à celle qui entre => la masse de l'œuf augmente ;
- Au cours du développement de l'embryon, les hypothèses citées ont cours tour à tour et entraînent des variations irrégulières de la masse.

La littérature nous apprend que les flux d'O₂ et de CO₂ s'équilibrent en masse mais qu'il y a une sortie importante et continue de vapeur d'eau au cours de l'incubation (15%), ce qui provoque la diminution régulière de masse de l'œuf (Figure n°1).

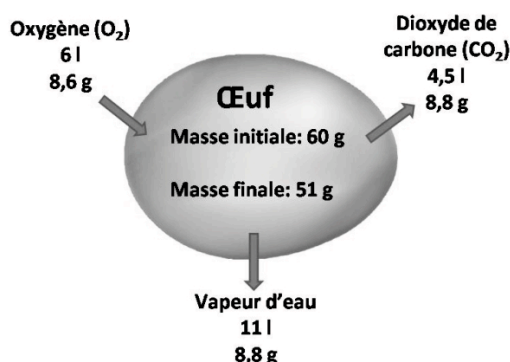


Figure n°1 : Au cours des 21 jours d'incubation, un œuf de poule de 60 g absorbe de l'oxygène et rejette du dioxyde de carbone et de l'eau. À la fin de l'incubation, avant que le poussin n'éclore, la masse a diminué de 15% (Sauveur, 1988).

Mais, phénomène beaucoup moins connu et qui va être à l'origine d'une partie de l'analyse didactique de la situation, cette perte d'eau se produit également dans les mêmes proportions avec un œuf non fécondé mis en incubation (Akyurek & Okur, 2009). L'utilisation de la perte de masse de l'œuf au cours de l'incubation, couramment utilisée par les professeurs comme indicateur du bon développement de l'embryon n'est donc pas pertinente. Mais ne pas inviter les élèves à suivre l'évolution de cette masse, au prétexte qu'elle n'est pas pertinente scientifiquement, ne permettra pas de conduire la réflexion qui doit déboucher sur l'appréhension de la spécificité du développement ovipare. Ce dilemme pose un problème tout à fait intéressant en termes de transposition didactique (Chevallard, 1985) que nous discuterons dans la troisième partie de cet article.

Cadre de l'étude

Disciplines mobilisées, notions et compétences visées

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une recherche INRP sur l'enseignement intégré des sciences à l'école. Cette manière d'aborder les sciences permet de ne pas cloisonner les disciplines dans des unités d'apprentissages exclusives mais, au contraire, d'aborder le problème complexe de la variation de la masse de l'œuf au cours de l'incubation, dans une approche où les différentes disciplines coopèrent pour permettre sa résolution.

Les disciplines et notions scientifiques impliquées dans cette étude sur l'évolution de la masse des œufs au cours de l'incubation sont listées ci-dessous :

- **Biologie** : principes d'oviparité, fonctions de nutrition (respiration cellulaire, digestion, circulation sanguine fœtale), développement embryonnaire.
- **Technologie** : balances et équilibre (balance Roberval ou électronique, tare).
- **Physique** : états de la matière: solides, liquides, gaz (propriétés) ; rappelons qu'au cycle 3, la notion de conservation de la masse pendant un changement d'état est à maîtriser alors que la conservation de la masse, de la charge ou de l'énergie au cours d'une réaction chimique est une notion abordée plus tard dans la scolarité.
- **Mathématiques** : calculs des différences de masses et traitement de données (tableaux et graphiques).

Autour de cette question et des disciplines que sont la biologie et la physique, un certain nombre de compétences liées à la démarche d'investigation vont être mobilisées (Drouard, 2008 ; Coquidé et *al.*, 2009): construction d'un problème scientifique et questionnement associé (Fabre & Orange, 1997 ; Orange, 2005), émission d'hypothèses, recours à la mesure dans le protocole expérimental, interprétation des résultats, structuration des connaissances etc.

Classes concernées

Le projet présenté ici a été réalisé dans trois classes de cycle 3 :

- La classe de **P**, CM2 hétérogène de périphérie urbaine. **P** est un PEMF qui a déjà conduit ce projet au cours des trois années précédentes.
- La classe de **G**, CE1/CE2 hétérogène de périphérie urbaine. **G** est une enseignante n'ayant que trois années d'expérience, elle est de formation littéraire.

- La classe de **J**, CE2 homogène d'une commune essentiellement résidentielle. **J** est une enseignante expérimentée de formation scientifique.

Les différences entre les classes et les profils des enseignants devaient nous permettre d'observer comment un même projet, difficile à mains égards, pouvait être conduit. Les enseignants étaient libres de conduire le projet comme ils l'entendaient, la seule contrainte qui leur était imposée était de mettre en œuvre des démarches d'investigation (MEN, 2002) dans lesquelles les élèves avaient une part active. Une aide logistique pour le matériel et un soutien scientifique pour les notions mal maîtrisées leur étaient proposés.

Toutes les séances ont été vidéoscopées et analysées.

Étude de l'évolution de la masse d'un œuf au cours de l'incubation : intérêts cognitifs et méthodologiques

Contextes d'émergence du problème de la pesée dans la classe

Il est intéressant de s'interroger sur la façon dont la question de variation de la masse des œufs en cours d'incubation a été abordée. Cette question n'apparaît qu'après l'introduction des œufs fécondés dans la classe et leur mise en couvaion.

Pour la classe de **P (CM2)**, le maître amène les élèves à se préoccuper du suivi des œufs, en sous entendant qu'il existerait un indicateur fiable du bon développement de l'œuf. La pesée des œufs est proposée par les élèves mais on peut douter qu'elle soit perçue comme un témoin du bon développement de l'œuf : c'est une mesure qu'il faudra réaliser comme les autres (taille, couleur) mais l'objectif reste imprécis. En énonçant alors lui-même la question « *Le poids d'un œuf varie-t-il pendant le développement de l'embryon ?* », le maître convaincra les élèves d'avoir à mesurer régulièrement la masse des œufs, car pour lui, c'est la différence de masse qui permettra d'identifier les œufs qui contiennent un embryon en développement. Il postule implicitement qu'un œuf qui ne change pas de masse est infertile. Il sera donc inutile de peser un œuf qui aura été jugé infertile par mirage¹. Les œufs de consommation, non fécondés, ne seront donc pas pesés non plus. La proposition de la pesée est ainsi faite par le maître mais rien n'est dit sur l'interprétation des variations. Elle sera explorée plus tard.

Pour **G (CE1/CE2)**, la mise en incubation des œufs lui permet de poser la question de savoir quoi faire avec ces œufs. La présence d'une balance à côté de la couveuse induira la proposition de la pesée ; mais c'est la maîtresse qui justifiera partiellement la nécessité de faire des mesures à un autre moment pour constater si l'œuf sera plus lourd ou moins lourd avec un embryon en développement. À ce stade, les élèves ne savent pas quel est l'objectif de ces pesées et surtout quel est le lien avec le projet de réussir à amener l'œuf à l'éclosion.

Pour **J (CE2)**, la question est posée d'emblée et l'enjeu est de savoir si l'œuf gardera le même poids pendant l'incubation. Après avoir recueilli les hypothèses, la classe convient de la nécessité de les peser régulièrement afin de répondre à la question.

¹ Le mirage consiste à observer l'intérieur de l'œuf par transparence grâce à une lumière blanche appliquée sur la coquille. L'opacité, la silhouette de l'éventuel embryon et les réseaux sanguins sont autant d'indices des stades de développement et de la viabilité de l'embryon. L'instrument qui sert à mirer est un mire-œuf.

Ainsi pour **P (CM2)**, il semble entendu que le suivi de la masse des œufs est un indicateur du bon développement des embryons, il induit donc la nécessité de pesées. Ce n'est pas le cas de **G (CE1/CE2)** et **J (CE2)** qui entreprennent le protocole de pesée sans interroger ces variations de masses au regard de ce qu'elles pourraient signifier sur le développement embryonnaire : l'intérêt d'avoir à suivre la masse des œufs au cours de l'incubation ne sera abordé qu'après avoir initié ou achevé l'incubation. Néanmoins, dans les trois classes, les protocoles de pesées sont élaborés après que les élèves aient, avec l'enseignant, formulé la nécessité d'avoir à mesurer les masses pendant l'incubation.

La pesée : protocoles de mesures, résultats et premières interprétations

Classe de P (CM2)

La première pesée a lieu au 4^{ème} jour d'incubation en parallèle avec le mirage d'œufs pris au hasard. Le choix pour la pesée est aussi conditionné par la nécessité de repérer par mirage la présence d'un embryon (masse sombre), présumant ainsi qu'il est fécondé. La pesée est faite par les élèves avec une balance électronique dont le principe de la tare est maîtrisé. Les masses sont reportées par les élèves sur une affiche en relation avec la date. Seules les masses de deux œufs seront reportées sur le tableau (œufs n°13 et 33). Sur le même tableau seront également reportées les mesures de la taille des œufs (diamètre et longueur) grâce à l'utilisation d'un pied à coulisse dont l'usage est expliqué par le maître. D'autres pesées seront réalisées sur l'œuf n°13 aux 7^{ème} et 9^{ème} jours ; la mesure de la masse sera interrompue après avoir décrété l'œuf « non fécondé » par mirage de l'œuf au 9^{ème} jour. Le fait que la masse de cet œuf n'ait pas varié du 7^{ème} au 9^{ème} jour (52 g) sert d'argument supplémentaire au maître pour affirmer que l'œuf est non fécondé. Pour le maître, la variation de la masse de l'œuf est donc un critère de développement embryonnaire (mais il ne donne aucune indication sur le sens de variation). L'œuf n°33 sera également pesé aux 7, 9, 14 et 19^{ème} jours car le mirage suggère que l'embryon se développe et que les premières mesures montrent une diminution de la masse (témoin donc, pour le maître, d'un développement embryonnaire).

Classe de J (CE2)

Après avoir proposé la balance le jour de l'arrivée des œufs dans la classe et après avoir convenu qu'il faudrait peser les œufs régulièrement pour répondre à la question sur l'évolution de la masse au cours de l'incubation, **J** incite les élèves à noter sur un tableau les résultats des mesures à venir. Les premières pesées sont donc effectuées par les élèves après que la maîtresse ait montré comment faire ; six œufs, a priori fécondés, seront pesés régulièrement aux jours 0, 3, 7, 10, 14 et 17 de l'incubation. Une réflexion sera faite par les enfants sur l'hétérogénéité de la masse des différents œufs au départ, ils sont en effet plus ou moins lourds : les enfants conviennent que cela est représentatif de la diversité des individus dans la nature. Pour les élèves de cette classe, la pesée des œufs est motivée par la question prédictive « *L'œuf va-t-il garder son poids initial pendant l'incubation ?* » ; elle n'est aucunement liée a priori à un contrôle du bon développement embryonnaire.

Classe de G (CE1/CE2)

Après avoir décidé qu'il allait falloir peser les œufs, **G** marque ceux-ci d'une croix pour repérer leur orientation au moment du retournement, en relation avec la localisation de la chambre à air et son rôle dans la respiration lors de l'éclosion. Elle pose alors la question

suiuante: « *Lesquels peut-on peser, on ne peut pas tout peser mais si on en pèse deux, lesquels prendre ?* ». Un élève propose un petit et un grand et **G** accepte cette proposition en disant que cela permettra de comparer la masse d'un œuf de poule naine avec celle d'une poule pondeuse. La maîtresse rappelle ensuite la méthode de pesée avec la balance Roberval posée à côté du mire-œuf (graduations des masses marquées, guidage sur l'approche par tâtonnement, recherche de l'équilibre, calculs des masses et comparaisons), le problème de la tare est éludé considérant que le support qui maintient l'œuf a une masse négligeable. Deux œufs sont pesés par deux enfants différents devant l'ensemble de la classe qui intervient de temps en temps pour aider. Les œufs pèsent 63 g et 33 g, **G** fait alors calculer la différence de masse mais ne l'interprète pas. Les deux œufs seront pesés à nouveau au 14^{ème} jour d'incubation en relation avec le mirage.

Les résultats des pesées menées dans les trois classes sont reportés en Annexe n°1 et commentés ci-après.

Choix du nombre d'œufs et de la date de mesure

La lecture du tableau de suivi des masses (Annexe n°1) nous montre que dans deux classes (**P** et **G**), il a été négocié de limiter le nombre d'œufs à deux afin de ne pas alourdir cette activité et ne pas la rendre trop chronophage. Le choix des œufs de départ s'est fait un peu au hasard chez **P** alors qu'il repose sur un critère de taille pour **G**. En effet, **G** décide de suivre un petit et un gros œuf, afin d'illustrer ici certains aspects de l'unité et de la diversité du vivant. On pourrait traduire ce choix par le questionnement suivant : « *Il existe des races de poules différentes qui pondent des œufs morphologiquement différents : la masse des œufs varie-t-elle selon la même tendance au cours de l'incubation ?* ». Par contre, elle présume que ces œufs sont a priori fécondés et qu'ils seront le siège à coup sûr d'un développement embryonnaire. Ce postulat est risqué pour deux raisons :

- ils ne sont d'abord pas nécessairement tous les 2 fécondés (il n'y a aucun moyen de le savoir réellement au départ) ;
- et ils peuvent avoir été soumis à une élévation de température, un refroidissement, un choc ou un autre événement néfaste qui oblitérera leur chance de développement ; en augmentant le nombre d'œufs suivis, on diminuerait le risque.

Ces deux raisons peuvent concerner en partie ou totalement les deux œufs choisis et donc conduire à un échec avec une forte probabilité ; ce risque n'a, à l'évidence, pas été apprécié par **G** et il est chanceux qu'un des deux œufs ait eu un développement embryonnaire (œuf n°1) comme l'a attesté le mirage (mais pas l'éclosion puisqu'aucun œuf n'a éclos dans cette classe). De plus, la variation de masse n'a été estimée qu'à deux périodes d'incubation, au début et au 14^{ème} jour d'incubation. C'était là aussi prendre le risque de manquer de données, mais le choix se justifiait par le fait que les mesures étaient faites à la balance Roberval et que l'opération réalisée par ces jeunes enfants de CE prenait beaucoup de temps. Dans la classe de **P**, la mesure des masses au début de l'incubation (jour 0) n'a pas été réalisée, le maître considérant que les premières transformations métaboliques ou morphologiques sont mineures et n'ont pas un réel impact sur les variations dans les mesures de masse que l'on peut faire à cette période ; les mesures ont donc débuté au 4^{ème} jour, pour se terminer au 19^{ème} jour, pour l'œuf contenant a priori un embryon en développement (sur la foi du mirage) et au 9^{ème} jour pour celui considéré comme « non fécondé ». Des pesées intermédiaires ont été réalisées pour multiplier les chances d'apprécier une tendance. Cette option a également été choisie

par **J** qui, avec 6 œufs et 6 mesures par œuf (dont celle du jour 0), a pu réinvestir une compétence mathématique travaillée par ailleurs sur le traitement et la mise en graphiques de données. En effet, ces données ont permis à la maîtresse de faire réaliser aux élèves des courbes de type « Masse de l'œuf = f (Temps) » pour visualiser la tendance générale de diminution de masses des œufs au cours de l'incubation et illustrer l'unité du phénomène de façon claire (Figure n°2).

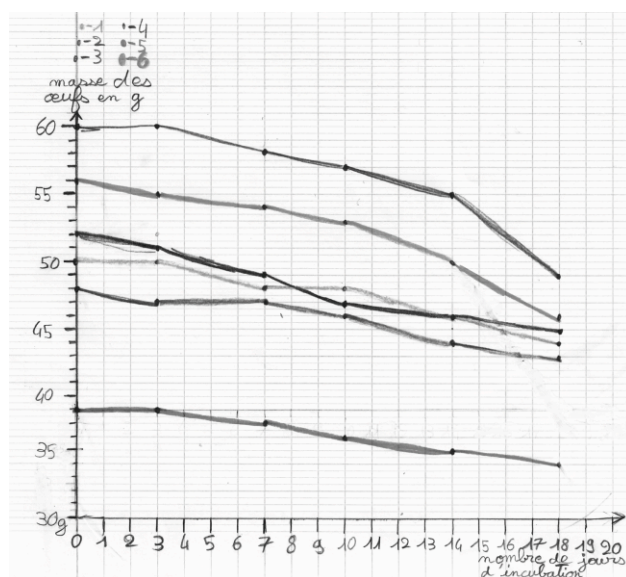


Figure n°2: Variation de la masse de six œufs au cours de l'incubation
(extrait d'un cahier d'élève de la classe de **J**)

Analyse de la valeur des mesures

La lecture du tableau de l'Annexe n°1 suscite un certain nombre de remarques sur les valeurs de ces mesures et sur l'amplitude des variations. Au départ, la masse des œufs utilisés dans les trois classes est comprise entre 33 g et 63 g, ce qui est cohérent avec ce que donne la littérature pour un œuf de poule. La tendance générale est qu'aucun œuf ne prend de poids ou ne conserve sa masse de départ, tous les œufs perdent du poids, mais dans des proportions qui varient selon les classes et selon les œufs d'une même classe. Les résultats exprimés en % de perte de masse par rapport aux masses de départ montrent qu'il y a une grande homogénéité pour les six œufs de la couveuse de **J** (les œufs perdent entre 10 et 14 % de leur masse en 17 jours d'incubation) alors que les deux œufs de la couveuse de **G** montrent de grosses différences de perte de masse (3 et 21 %). Nous proposons ici quelques hypothèses pour expliquer ces résultats :

- a) Imprécision des mesures réalisées à la balance Roberval chez **G** alors qu'elles ont été faites à la balance électronique chez **J** ;
- b) Pour l'œuf n°2 qui n'a perdu que 3% de sa masse, méconnaissance d'un possible traitement préalable néfaste de l'œuf (assèchement de l'œuf ou occlusion accidentelle des pores de la coquille) ;
- c) Pour l'œuf n°1 qui a perdu 21% de sa masse, lésion de la coquille non visible à l'œil nu favorisant une plus grande évaporation, température d'incubation trop élevée ou hygrométrie insuffisante.

Ces possibilités d'artéfacts ne s'excluent pas et peuvent rendre compte des résultats observés dans la classe de **G**. La perte de poids attendue en fin d'incubation est, dans les conditions de température et d'hygrométrie préconisées, de l'ordre de 13 à 15 %. Les résultats de **J** sont donc assez conformes avec ces valeurs (puisque prises au 17^{ème} jour) et en adéquation avec le nombre d'éclosions observées à la fin (quatre éclosions sur six œufs). De même, on peut remarquer que les variations atypiques de masses constatées chez **G** préfiguraient un problème qui s'est d'ailleurs traduit par la non-éclosion des poussins en fin d'incubation. Les résultats de **P** montrent une tendance similaire à **J**, c'est-à-dire une diminution assez régulière de la masse (œuf n°33 suivi jusqu'au 19^{ème} jour), mais dans une proportion moindre (7% à 19 jours et 10 à 14% à 17 jours) ; un excès d'hygrométrie pourrait expliquer cette différence d'amplitude et conduire au faible taux d'éclosion obtenu à la fin (5 sur 35 œufs). En effet, l'hygrométrie doit être finement maîtrisée car elle influe sur le volume de la chambre à air qui est déterminant au moment de l'éclosion : une trop grande hygrométrie limitera le volume de cette poche d'air et ne permettra pas à un poussin de s'oxygéner suffisamment dans les heures qui précèdent l'éclosion au moment où il rompt cette chambre à air. Des problèmes de manipulations trop brutales ou de variations de températures accidentelles peuvent aussi être à l'origine des problèmes rencontrés.

Émission d'hypothèses sur la question de la variation de la masse de l'œuf

Les conditions qui ont conduit les élèves à formuler quelques hypothèses sont reportées ici.

Classe de P (CM2)

Pour **P**, la question de la variation de la masse de l'œuf ne concerne que les œufs dont l'embryon se développe (« œuf fécondé »), pour les autres on ne devrait rien voir, la masse devrait rester invariante. **P** s'appuie sur les mesures réalisées sur l'œuf n°13. Entre le 7^{ème} et le 9^{ème} jour d'incubation la masse n'a pas varié (52 g) et le mirage corrobore le non-développement ; la pesée sera abandonnée pour cet œuf alors que, nous le verrons, qu'il soit fécondé ou pas, un œuf incubé à 39°C à une masse qui diminue au cours du temps. Ce concours de circonstances a servi son discours et les élèves l'ont logiquement accepté. Sur cette base, à la question posée « *Le poids de l'œuf varie-t-il pendant l'incubation ?* », les élèves ont formulé des hypothèses au 9^{ème} jour d'incubation. Ces hypothèses sont proposées après avoir pesé les œufs et constaté que la masse diminuait : « *Pour l'œuf n°33, le poids de l'œuf diminue au cours de l'incubation* ». C'est donc que l'embryon se développe comme le confirment, et le postulat du maître, et le mirage. On n'est donc plus dans une situation prédictive, mais plutôt dans un questionnement en situation où l'on va devoir confronter la réalité de l'observation (diminution de la masse) aux conceptions des élèves : « *Non, mais ça doit être le contraire puisque l'embryon il se développe, donc en grandissant il doit prendre du poids* ». L'élève doute ici du résultat obtenu, la masse de l'œuf aurait du augmenter ; néanmoins, cette hypothèse ne contredit pas le postulat du maître (un œuf en développement change de masse).

Suite à cette hypothèse, une discussion s'engage entre les élèves (**E**) et le maître (**P**) :

E1 : *Peut-être que c'est le liquide qui est plus lourd que l'œuf ?*

P : *Quand tu dis « liquide » de quoi parles-tu ?*

E1 : *Le vitellus et le blanc.*

P : *Ce ne sont pas exactement des liquides. Est ce qu'on peut se rappeler des hypothèses qu'on avait faites sur le rôle du vitellus et du fait de voir des vaisseaux sanguins dessus ?*

E2, E3 : *Pour le confort,... le protéger, Il deviendra la peau...*

P : *Mais le poids de l'œuf diminue, on l'a mesuré, or l'embryon grossit : comment l'expliquer ?*

E1 : *Peut être que le vitellus et albumen c'est plus lourd qu'un embryon.*

P : *Ça veut dire qu'il faudrait qu'on connaisse à tout moment le poids du vitellus, de l'albumen et de l'embryon ?*

E2 : *Pour ça il faudrait disséquer !*

P : *Oui, ce serait intéressant effectivement.*

E3 : *Peut-être que plus l'embryon il grossit, plus son poids il diminue.*

P : *Mais le poids de quoi ? de l'œuf ? de l'embryon ? Le poids de l'œuf, de quoi il est constitué ?*

E+P : *Du vitellus, de l'albumen et de l'embryon.*

P : *Alors dans l'œuf au départ on avait vitellus/albumen (fait un geste avec ses doigts pour dénombrer deux éléments) et aujourd'hui on a vitellus/albumen/embryon (fait un geste avec ses doigts pour dénombrer trois éléments).*

E4 : *Plus la coquille !*

P : *Oui, mais la coquille elle y est dans tous les cas.*

E2 : *Et aussi la poche d'air qui peut peser ?*

P : *Oui mais je ne suis pas sûr qu'on ait des balances qui puissent peser la masse de l'air !*

E5 : *Peut-être que plus l'embryon se développe, plus le vitellus et l'albumen ils « fusionnent », ils deviennent de plus en plus petits.*

P : *Il y aurait donc une sorte de transfert, plus l'embryon grossit plus l'albumen et le vitellus réduisent.*

E3 : *Oui parce que l'embryon prend beaucoup de place...*

P : *Oui mais pas d'un coup comme ça ! (claquement de doigts pour illustrer la rapidité du phénomène)*

E3 : *Mais aussi on avait dit que peut-être le vitellus c'est des aliments.*

P : *Ah oui, je vous rappelle que quand on avait vu des vaisseaux sanguins se développer sur le vitellus on s'était dit alors peut-être que c'est la nourriture de l'embryon, ça voudrait dire que si l'embryon grandit, la nourriture ... ?*

E3 : *... diminue. Donc le poids diminue aussi !*

P : *Voilà ça pourrait être ça.*

E5 : *Mais non, si l'embryon grossit pourquoi le poids diminue ? (sous entendu la prise de poids de l'embryon devrait compenser la perte de poids du vitellus/albumen et la masse ne devrait pas varier)*

E6 : *Parce que ça diminue et après 18 jours ça va augmenter (hypothèse non retenue par le maître)*

P : *Je vais juste répondre à ta question en répondant par un exemple : si je nourris ce jeune homme (un élève) avec une pomme de 100 g, va-t-il prendre 100 g de poids ?*

E2 : *Non, il va faire des selles...*

P : *Oui parce que dans la digestion, il se passe des choses... (référence faite au cours sur la digestion vu dans l'année).*

E7 : *Il y a des sucs digestifs, des aliments qui se transforment en graisse, l'estomac broie les aliments en bouillie, les choses inutiles sont laissées, les vitamines sont conservées, les...*

P : *Oui mais même ce qui va rester dans son corps va être consommé par son corps, parce qu'il a un cœur qui bat, un corps qui doit rester à 37°C, quand il se déplace les muscles ils*

consomment de l'énergie, un certain nombre de choses, donc lui il va en profiter pour faire fonctionner son corps mais il ne va pas forcément prendre de la masse.

E5 : On avait vu que le corps il prenait ce qu'il avait besoin mais ce qu'il avait pas besoin, ce qu'il ne rejetait pas il le gardait.

P : Oui, quand il y en a trop effectivement, on peut stocker.

Après cette discussion, les élèves sont invités à travailler sur un document montrant l'intérieur de l'œuf au cours de l'incubation : cette investigation documentaire guidée leur permettra de mettre en évidence les transformations morphologiques de l'embryon et la diminution du volume de vitellus. Le lien avec la diminution de la masse de l'œuf ne sera pas évoqué ici. Le maître demande ensuite aux élèves de commenter un tableau des masses de l'embryon, de la coquille et du blanc+jaune aux jours 0, 7, 14, 21 (Tableau n°1). Ils dégageront de ces données que le poids de la coquille diminue pour permettre au poussin d'éclore et de fabriquer son squelette (consommation du calcium), que le poids de l'embryon augmente parce qu'il consomme grâce aux vaisseaux sanguins reliés à son « *nombril* » le vitellus et l'albumen et que l'œuf est moins lourd à la fin de l'incubation car l'embryon consomme plus qu'il ne grossit (pas d'allusion aux échanges gazeux, aux pertes d'eau, de CO₂ et à la porosité de la coquille, mais précision sur le fait que les organes vitaux de l'embryon ont besoin d'énergie issue de la consommation du jaune et du blanc, cette consommation n'entraînant pas pour autant une prise de poids). Un bilan collectif oral de ce projet (celui de réussir à « *copier la nature* », c'est-à-dire assurer une couvaison sans la poule), puis une évaluation terminale permettront au maître de s'assurer que ces notions sont acquises. Lors du bilan, un élève précisera de lui-même la différence entre « œuf fécondé » et « embryon ou œuf en développement », qui a été une imprécision récurrente dans les séances. Enfin, à la question « *Si le mire-œuf est cassé comment faire pour savoir si l'embryon se développe ?* », les enfants répondront « *En pesant l'œuf, si le poids diminue, alors un embryon se développe à l'intérieur* ».

Classe de J (CE2)

La question sur la variation de la masse des œufs et les hypothèses formulées par les enfants ont lieu le jour de l'arrivée des œufs dans la classe (jour 0) ; on est ici dans un contexte prédictif, les élèves doivent énoncer leurs hypothèses sur la base de leurs représentations. Il s'agit de la 6^{ème} séance du projet et les élèves ont déjà travaillé sur les modalités de la fécondation chez la poule, l'anatomie de l'œuf et les besoins des œufs pendant la couvaison, mais n'ont pas encore abordé formellement les caractéristiques du développement embryonnaire (notamment la fonction de nutrition). « *Il ne va pas garder le même poids car au début il est tout minuscule, l'embryon, et il va grossir donc l'œuf va peser plus lourd* » (hypothèse n°1, expression d'une causalité associant augmentation de taille et de masse).

Après cette proposition une discussion s'engage entre les élèves (E) et la maîtresse (J) :

E1 : Non, car il mange pas, le poussin !

E2 : Si, il se nourrit de ce qui l'entoure. Du jaune, du blanc.

E3 : Il doit se nourrir pour grandir.

E4 : Il va peser plus de poids car le poussin au début c'est un rond et à la fin il a grandi et il y a des petites plumes (hypothèse n°2 proche de la première avec transformation morphologique associée au développement de l'embryon).

E5 : *Moi je pense qu'il ne va pas peser plus lourd car il va manger le blanc mais le blanc va peser le même poids dans son ventre* (hypothèse n°3, conservation de la masse dans un espace clos).

E6 : *Oui le blanc diminue, l'embryon grossit, mais comme il digère le blanc il le réduit, il y en a moins, et la masse diminue* (hypothèse n°4, reprise et modification de l'hypothèse n°3).

E7 : *Si l'embryon (œuf) maigrit, il est en train de mourir* (hypothèse n°5).

J : *Comment on pourrait faire pour savoir ?*

E2 : *On peut prendre une balance qui prend pas les gros poids, on le pèse au début et au bout de 1 à 2 semaines, euh 1 à 2 jours on le met pour savoir si il augmente.*

J : *J'ai une balance. Elle mesure des petits poids en grammes. Pour ne pas casser les œufs je vous ai préparé un petit bac. Mais quand on l'allume elle va se tarer avec ce bac. On va le faire au fil des jours. Une fois que l'on a relevé le poids, que peut-on faire ?*

E3 : *On le note au tableau.*

Les œufs seront alors pesés et les données organisées dans un tableau. À l'issue de cette séance, les élèves constatent que les œufs ont des poids différents, l'un d'eux affirme que c'est parce qu'ils n'ont pas été pondus au même moment et que donc certains sont plus vieux que d'autres (les plus lourds) ; la maîtresse corrige l'affirmation en disant que tous les œufs ont été pondus le même jour et que l'hétérogénéité de leur masse est comme celle qui existe avec des bébés à la naissance, tous n'ont pas le même poids, un élève dira « *Oui, il y en a des grands et des petits* » (unité et diversité du vivant : tous les bébés sont faits de la même façon mais il y en a de différentes tailles, de différents poids).

Au 7^{ème} jour d'incubation les œufs sont pesés, les élèves constatent que la masse a diminué pour tous les œufs. La maîtresse note les réflexions des élèves sur le tableau de mesures : « *L'embryon mange le blanc* », « *L'embryon respire l'air contenu dans l'œuf* », « *Mais non car il y a des trous sur la coquille pour faire passer l'air, et donc il y a toujours la même quantité d'air et donc c'est pas parce qu'il respire l'air et qu'il n'y en a plus que le poids diminue* ». Cette étape évoque pour la première fois les notions de respiration et de porosité associées à des échanges gazeux (air). À ce stade, la maîtresse n'explore pas plus avant ces points en relation avec la diminution de masse des œufs.

Au 10^{ème} jour d'incubation, le mirage des œufs permet de faire apparaître plus nettement la chambre à air, les enfants remarquent que « *La chambre à air a grossi, il y a plus d'air à l'intérieur, elle s'est remplie d'air, il y a moins de nourriture, on voit l'embryon, il commence à manger, pour ceux dont la chambre à air est développée, il y a plus de chance qu'ils arrivent à sortir de l'œuf* ». Les œufs sont alors pesés, les masses continuent à diminuer. Les hypothèses intermédiaires de la séance précédente sont rappelées et une question est posée : « *La chambre à air a grandi, comment s'est-elle remplie d'air ?* ». Les élèves reprennent l'idée de trous sur la coquille qui avait été proposée par un élève auparavant. Un élève ajoute : « *L'embryon a mangé le blanc donc il y a plus de place pour l'air, donc l'air rentre. Et comme l'air ça pèse moins que le blanc, donc l'œuf pèse moins lourd* » (hypothèse n°5 intermédiaire qui s'approche de l'hypothèse n°4). À ce stade, la maîtresse revient sur le tableau des mesures de masse, elle fait mettre en relation l'évolution des masses avec ce qui vient d'être dit et l'observation par mirage de ces œufs : les élèves suggèrent que l'œuf qui n'a pas perdu de masse entre le 7^{ème} et le 10^{ème} jour est suspect car en plus la chambre à air semble ne pas grandir ; pour les autres œufs la diminution de masse est en accord avec la dernière hypothèse émise et le mirage. Ici, les enfants traduisent donc qu'une perte de masse est un indicateur de bon

développement de l'œuf ; mais le bon témoin n'est pas utilisé, il faudrait voir comment un œuf non fécondé évolue dans le temps. La maîtresse reprend ensuite l'idée d'entrée d'air grâce à des trous qui s'accompagne de l'augmentation de la chambre à air. À ce stade, il n'est pas évoqué d'échanges gazeux bilatéraux, l'air ne fait que rentrer pour expliquer l'augmentation de la chambre à air, mais les élèves ont malgré tout déjà parlé de respiration. La maîtresse les amène alors sur le terrain des échanges gazeux liés à la respiration :

J : *L'air peut passer dans les œufs à travers la paroi par des trous. Vous, respirez-vous toujours le même air ?*

E1: *Non, lui c'est pareil il doit changer d'air.*

J : *Est-ce que vous savez ce que l'on recherche dans l'air pour pouvoir vivre ?*

E2 : *Du gaz.*

J : *Quel gaz ?*

E2 : *De l'oxygène.*

J : *On respire quoi, on sort quoi ?*

E3 : *On sort ce qui n'est pas bon pour nous, du gaz carbonique.*

J : *Si on est toujours enfermé dans le même air que va-t-il se passer ?*

E4 : *On va avoir que du gaz carbonique, on va mourir.*

E5 : *Notre poussin va respirer. Comme il y a des trous, l'air c'est normal qu'il sorte et qu'il entre. L'oxygène peut entrer et le gaz carbonique peut sortir.*

L'élève E5 synthétise ici l'idée d'entrée et sortie d'air de l'œuf à travers des trous de la coquille en relation avec la respiration dont les modalités au niveau de la nature des gaz échangés semblent connues. À ce stade, l'hypothèse qui semble admise par la classe est donc celle d'un remplacement du blanc par de l'air, le blanc sert à nourrir le poussin, l'air sert à l'embryon pour respirer (entrée d'O₂ et sortie de CO₂) et pour augmenter le volume de la chambre à air afin d'aider le poussin à éclore. L'idée de diminution de la masse n'est donc pas complètement résolue ici: que devient le blanc digéré ? Y a-t-il un lien avec les échanges gazeux, la respiration ?

La maîtresse clôt ici ce débat et comme la discussion tournait autour de trous et de gaz, elle pose la question suivante : « *Comment pourrait-on montrer qu'il y a des trous ?* ». Des expériences pour mettre en évidence la porosité de la coquille seront alors proposées et réalisées par les élèves. Par la suite, une séance de visionnage des différents stades d'évolution de l'embryon permettra aux enfants de déduire entre autres détails anatomiques que l'embryon grandit dans l'œuf en se nourrissant du blanc mais aussi du jaune, grâce à un réseau sanguin très développé, que la membrane coquillière est elle aussi poreuse et que les trous sur la coquille s'appellent des pores.

Après le 14^{ème} jour d'incubation, les œufs sont à nouveau pesés, les élèves constatent que la masse diminue à nouveau (4 à 6 g) et qu'au mirage l'embryon grossit ainsi que la chambre à air. La maîtresse précise alors qu'avec la balance on ne peut peser que l'œuf entier. Elle propose alors aux enfants le Tableau n°1 (en page suivante), explicite brièvement son organisation et demande aux enfants de le commenter.

Ils comprennent progressivement, par un jeu de questions/réponses, que quand un des constituants « *baisse* » le poids global baisse (sauf l'embryon) ; que la masse du jaune et du blanc diminue car ils sont « *mangés* ». La maîtresse résume alors : « *Il s'est servi du jaune et du blanc pour fabriquer une partie de son corps* ». La question posée sur la diminution du poids de la coquille aboutit à trois hypothèses : faire de la place au

poussin, fragiliser la coquille pour faciliter l'éclosion ou servir de nourriture pour l'embryon pour former les os ; la dernière hypothèse est guidée par la maîtresse par un jeu de question qui aboutit à cette énonciation. Mais, malgré le fait que la somme de tous les éléments constitutifs de l'œuf corresponde à la masse de l'œuf quel que soit le jour de la mesure, un élève ne comprend pas que la masse globale de l'œuf diminue. Ils évoquent la digestion et les excréments mais la maîtresse leur dit que l'embryon n'en produit pas. Elle précise qu'à l'instar des vivipares dans l'utérus maternel, l'embryon se nourrit grâce à un réseau sanguin qui va puiser des nutriments, dans le sang maternel pour les vivipares, dans le blanc et le jaune chez la poule. Ce blanc et ce jaune « *servent à grandir* ». Une question est posée par **J** : « *Où va la masse manquante ?* ». Les enfants ne trouvant pas, **J** relance le débat par la question : « *Qu'avons-nous mis en évidence sur la coquille ?* ». Les élèves répondent alors rapidement « *Des pores, ils servent à respirer, il y a des échanges gazeux, le CO₂ est éliminé donc la masse diminue* ». **J** relance encore « *Et que passe par les pores aussi, comme avec notre peau ?* », ils répondent qu'il y a de la transpiration, donc perte d'eau et de masse. Le reste de la séance sera consacrée à la construction de courbes d'évolution de la masse des six œufs (Figure n°2) : travail sur les axes, sur le choix de l'échelle, sur le positionnement des points et sur la signification des pentes de la courbe (la construction de graphiques à partir de données a déjà été abordée dans cette classe dans le cadre d'un suivi de mesures pluviométriques d'un projet météo). Les courbes seront analysées et celles qui « *descendent bien* » seront considérées comme un indicateur de bon développement de l'œuf, indice qui apparaît moins aisément sur le tableau de relevé des mesures.

	Poids en grammes			
	œuf entier	poussin en formation	coquille	jaune + blanc
Incubation depuis ...				
0 heure	68	-	8	60
7 jours	67	2	7	58
15 jours	54	11	6	37
20 jours	52	48	4	0

Tableau n°1 : Évolution de la masse des différents constituants de l'œuf au cours de l'incubation (Extrait et adapté de Tavernier R. (2002) *La découverte du monde vivant*, p. 311. Bordas)

Classe de G (CE1/CE2)

Lors de l'arrivée des œufs dans la classe, la maîtresse suggère aux élèves qu'ils auront à peser les œufs afin de voir s'ils sont « plus lourds maintenant ou quand il y aura un poussin dedans », c'est-à-dire s'ils prendront du poids au cours de l'incubation. Les pesées faites le 1er jour ne donnent pas lieu à hypothèses. Les élèves seront sollicités le 14^{ème} jour, au début de la seconde pesée : « *J'ai oublié de vous demander, le petit œuf qui pesait 33 g, va-t-il peser plus lourd ou moins lourd ?* ». Comme **J**, **G** se place dans une démarche prédictive. Elle réalise un sondage à main levée, une majorité pense que l'œuf sera plus lourd et une minorité qu'il sera moins lourd ; aucun ne pense qu'il aura le même poids. Elle demande aux élèves de justifier leur choix : « *Il (l'œuf) sera plus lourd parce qu'il (l'embryon) s'est plus développé* ». La causalité est bien exprimée, mettant en relation

augmentation de la taille et de la masse. « *Il va être moins lourd parce qu'il s'est un peu développé donc l'œuf n'est pas assez lourd* » : recherche d'une causalité (« parce que »), mais la formulation est confuse. Si on enlève le « un » de « un peu », on peut comprendre que l'élève a voulu dire qu'il est moins lourd que ce qu'il aurait dû être car l'embryon n'est pas encore assez développé ; et dans ce cas, il faut comprendre qu'il fait l'hypothèse que l'œuf sera quand même plus lourd en fin d'incubation.

À la suite de ces hypothèses, le petit œuf (n°1) est pesé, il ne fait plus que 26 g ; G engage un débat avec les élèves (E) et demande pourquoi :

E1 : *Il y a plus d'air* (ils savent par mirage que la chambre à air augmente en volume).

G : *Oui mais si tu rajoutes de l'air, qu'est-ce qui va partir ?*

E2, E3 : *De l'eau, de l'humidité.*

G : *Donc l'œuf a rejeté l'eau, l'humidité, il y a un peu d'eau qui se trouve dans l'œuf qui s'est évaporée. Et pourquoi ça ne pèse pas plus lourd ?*

E : ...

G : *Comment se développe le poussin ?*

E4 : *Il mange, le blanc et le jaune.*

G : *Donc il grandit en mangeant le blanc et le jaune, ce qui veut dire que tout ce qu'il mange il le transforme dans son corps pour grandir, mais il ne peut pas peser plus lourd que ce qu'il mange ?*

E : ...

Devant le mutisme des enfants, la maîtresse décide de modéliser le phénomène à l'aide de pâte à modeler, une maquette modelable en quelque sorte :

G : *Je vais vous montrer d'une autre façon. Si on prend une boule de pâte à modeler, c'est l'œuf, c'est le jaune et le blanc, (elle montre une boule de pâte à modeler en forme d'œuf), on imagine que le poussin se développe (elle commence à modeler un poussin en parlant), il mange le jaune et le blanc et il commence à faire ses ailes, ses pattes... (elle donne des formes précises à la pâte)... mais par rapport au début, il y a toujours la même quantité (G montre la forme « poussin »), au départ il y a toujours la même boule (même quantité) qui s'est transformée en poussin (elle fait le geste du passage de la boule au poussin) mais il y a toujours la même chose (même quantité de matière).*

G : *Et puis le liquide s'est un peu évaporé (elle enlève des petits morceaux de pâte à modeler), des toutes petites gouttes d'eau qui se sont évaporées...*

E : *...qu'on ne peut pas voir...*

G : *... petit à petit, chaque jour (elle continue à enlever des petits morceaux) et du coup l'œuf est un peu plus léger.*

La maîtresse n'interpelle pas les élèves sur ce qu'elle vient de montrer. Le deuxième œuf est pesé, il n'a perdu que 2 g, la maîtresse affirme que ce n'est pas un bon signe : « *Normalement, il aurait dû perdre plus que ça, je ne suis pas sûr qu'il se soit bien développé* ». Sur la trace écrite de synthèse rédigée collectivement par les enfants, la diminution de la masse des œufs est indiquée, il est dit que l'embryon a pris plus de place et a grandi car il a mangé le blanc et le jaune et qu'ils sont plus légers parce que de l'eau s'est évaporée en se transformant en gaz. Il n'est pas fait mention de porosité de la coquille, les élèves n'ont d'ailleurs pas abordé cette question, le transport des gaz n'est donc pas évoqué, dans un sens comme dans l'autre.

Remarque sur la modélisation empruntée par G (CE1/CE2)

Lorsque la maîtresse propose d'expliquer la conservation de masse de l'œuf au cours de l'incubation, beaucoup d'élèves restent perplexes. Bideaud et *al.* (1994) montrent que l'idée de conservation de la matière se construit lentement et s'affirme après 8 ans. Les élèves de **G** sont en CE1/CE2 et n'ont donc pas tous dépassé ce stade. Cette épreuve piagétienne de conservation de substance transposée à notre problème éclaire la difficulté que peuvent avoir les enfants à comprendre la modélisation proposée par la maîtresse. Certes l'argument de compensation (le poussin a la même masse que le blanc et le jaune mais n'a pas la même forme) est recevable dans ce type de transformation métabolique. Par contre, les arguments d'identité et de réversibilité ne peuvent s'appliquer ici : pour l'argument d'identité, le jaune et le blanc sont certes devenus le poussin sans apport extérieur, mais avec par contre la perte d'un peu de matière sous forme d'eau et surtout la transformation chimique de la matière. L'argument de réversibilité n'est pas recevable non plus car d'un poussin on ne refera pas du jaune. C'est peut-être ces obstacles qui expliquent la difficulté chez certains élèves à comprendre l'analogie de la modélisation proposée. En effet, pour admettre cette équivalence, il faudrait que l'élève soit en mesure de comprendre qu'il n'y a pas homologie entre le modèle et la réalité du poussin mais analogie portant sur la seule compensation.

Remarque sur le suivi de la taille chez P (CM2)

Chez **P**, les mesures réalisées sur la taille de l'œuf (longueur et diamètre) s'avèrent invariantes. Ces données ne sont pas mises en relation avec celles de la diminution de masse et n'étaye pas la réflexion sur les phénomènes liés au développement ovipare, à savoir que l'embryon se développe en consommant les réserves de l'œuf. L'œuf ne grossit pas alors que l'embryon grossit, ce qui pouvait éventuellement être imaginé. Le maître se contente de faire formuler une conclusion : « *La taille de l'œuf ne change pas au cours de l'incubation* ». À la remarque d'un élève constatant que la taille est malgré tout différente d'un œuf à l'autre, il répond que « *le cloaque des poules n'est pas calibré, il y a des petites poules et des grosses poules, tous les animaux sont identiques (c'est-à-dire qu'ils appartiennent tous à la même espèce) mais en même temps ils sont tous différents et uniques* » : il illustre ainsi un aspect de la diversité du vivant, comme quand **G** négocie les œufs à peser (un « *petit* » et un « *gros* »).

On voit que la mise en concordance des pesées et du développement embryonnaire pose problème. Au-delà des incertitudes des résultats dues à des techniques de pesées et d'incubation mal maîtrisées, le problème de la pertinence de ces pesées reste malgré tout posé. Ce qui nous a incités à aller voir ce qu'en disait la littérature savante (se référer au préambule scientifique en début d'article).

Pertinence de l'investigation scientifique proposée

Nous essayons dans cette partie de réfléchir au traitement didactique de la question de la variation de masse des œufs. En effet, le suivi de l'évolution de la masse des œufs incubés s'est imposé, chez les trois professeurs, comme une activité dont la pertinence n'a jamais été discutée. La proposition de suivre l'évolution de la masse d'un œuf non fécondé, qui aurait pu être prise comme témoin, n'est jamais faite. Le seul témoin envisagé est la masse de la première mesure, point de départ de la comparaison. La littérature scientifique confirme que la perte de masse des œufs fécondés ou infertiles conservés après la ponte

peut être considérée, en terme de bilan, comme liée à la sortie d'eau à travers les pores. Comme nous l'avons déjà rappelé, le plus surprenant est que les pertes de masses sont quasi identiques chez les œufs fécondés et non fécondés. L'évolution de la masse de l'œuf au cours de l'incubation n'est donc pas un indicateur pertinent du bon développement de l'embryon. L'expérience réalisée dans la classe de **J**, qui met en évidence que les œufs n°1 et 5 qui ne se sont pas développés (l'ouverture des œufs après le 23^{ème} jour l'a montré) ont une cinétique de perte de masse similaire à ceux qui ont produit des poussins, est d'ailleurs tout à fait conforme aux données de la littérature scientifique. Ces résultats ne sont pourtant pas interprétés et le postulat associant perte de masse et développement embryonnaire n'est pas remis en cause. Ainsi, la question posée aux enfants sur l'évolution de la masse des œufs et l'interprétation des mesures réalisées en classe, dont la pertinence s'appuie sur un principe erroné, méritent d'être réinterrogées.

Cette question doit être questionnée elle-même par rapport à ce qu'elle implique :

- Quels objectifs ont motivé cette question chez les maîtres ?
- Maîtrisent-ils les notions scientifiques sous-jacentes et les identifient-ils correctement?
- Ces notions sont-elles à la portée des élèves de cycle 3 ?

Lorsque des réponses auront été apportées à ces questions, il faudra alors savoir si ces notions ont réellement trouvé résonance auprès des élèves et avec quelles limites scientifiques cette question mérite malgré tout d'être posée.

Quels objectifs cette question a-t-elle permis d'exploiter ?

L'analyse des séances de classe montre que les objectifs visés par les trois enseignants au regard de cette question sont en partie communs mais les choix didactiques ont mis en évidence des divergences notoires. Ainsi, tous trois abordent cette question et construisent leurs séances avec l'idée que la masse des œufs pourra être mise en relation avec l'aspect des œufs observés par mirage : en effet, ils montrent avec un degré de précision différent que le développement de la chambre à air est, avec la diminution de la masse, un indicateur cohérent du développement de l'embryon. De plus, chez **J**, la mise en évidence de la porosité de la coquille viendra étayer la notion d'échanges gazeux associés à la respiration et renforcera l'idée que la diminution de masse de l'œuf a pour origine ces échanges gazeux. Un élève proposera d'ailleurs : « *Notre poussin va respirer. Comme il y a des trous, l'air c'est normal qu'il sorte et qu'il entre. L'oxygène peut entrer et le gaz carbonique peut sortir* ». Notons que **P**, qui met en évidence par microscopie la porosité de la coquille, n'utilise pas cet argument pour expliquer la fuite de vapeur d'eau à l'origine de la baisse de poids. Pour **G**, la porosité n'est pas explorée ; l'évaporation de l'eau de l'œuf sera proposée comme un fait, sans en préciser les modalités de diffusion. Enfin, et c'est peut-être le plus important, en posant cette question, les trois enseignants abordent un des principes fondamentaux qui définit l'oviparité à savoir que l'embryon se nourrit à partir des seules réserves de l'œuf, le blanc et le jaune. En ce qui concerne les objectifs méthodologiques, ce problème a permis de poser dans les trois classes les jalons d'une démarche scientifique :

- 1) Formulation d'hypothèses avec expression de causalités qui vont évoluer dans le temps : « *Il ne va pas garder le même poids car au début il est tout minuscule, l'embryon, et il va grossir donc l'œuf va peser plus lourd* » ; ou encore lorsque la

diminution de la masse aura été mise en évidence : *«Oui le blanc diminue, l'embryon grossit, mais comme il digère le blanc il le réduit, il y en a moins, et la masse diminue.»* ;

2) Test de l'hypothèse par l'expérience (protocole de pesée des œufs) ;

3) Analyse et interprétation des résultats des mesures pour infirmer ou confirmer les hypothèses.

La mise en évidence rapide de la perte de masse amène les élèves à explorer de nouvelles hypothèses. Qu'est-ce qui a pu sortir ? Comment cela est-il sorti ? Qu'est-ce qui l'a remplacé ? Une des hypothèses émises par les élèves est la suivante : *«L'embryon a mangé le blanc donc il y a plus de place pour l'air, donc l'air rentre. Et comme l'air ça pèse moins que le blanc, donc l'œuf pèse moins lourd ».*

D'un point de vue méthodologique, les protocoles de pesées ont été différents. **J** et **P** ont choisi la balance électronique avec l'idée d'utiliser un outil de mesure rapide et précis pour leur protocole expérimental dans le cadre d'une démarche d'investigation alors que **G**, ayant des élèves moins âgés, a choisi la balance Roberval pour travailler surtout les compétences liées à l'utilisation de cet instrument de mesure. **J** a multiplié les mesures afin de répondre à l'exigence de reproductibilité inhérente à l'expérience scientifique ; elle a également pu utiliser ces données pour travailler la mise en graphique et interpréter l'allure des courbes en relation avec le problème posé.

Un questionnaire a été proposé aux maîtres à la fin de leur projet pour qu'ils hiérarchisent les objectifs qu'ils pensaient avoir visés au regard de la question sur la variation de masse de l'œuf (Annexe n°2).

Les réponses sont résumées dans le Tableau n°2 en page suivante. Celles-ci montrent une divergence dans les objectifs affichés. Si certains sont communs avec ceux réellement visés au cours de leur séance (concept d'oviparité pour **J** et **P**, utilisation de la balance pour les trois, notion de conservation de la masse pour **G** qui est d'ailleurs la seule à avoir tenté une modélisation à base de pâte à modeler pour illustrer cette notion) d'autres sont en contradiction avec ce qui a réellement été abordé en classe : **P** affirme avoir voulu réaliser des courbes avec les données or cela n'a pas été fait et en revanche il oublie, comme les deux autres enseignants, de citer l'objectif récurrent dans sa démarche qui concerne la corrélation entre la variation de la masse de l'œuf et le bon développement de l'embryon. Ces divergences entre les objectifs travaillés en classe et ceux imaginés a posteriori dénotent une complexité afférente à cette question simple a priori mais qui sous-tend la maîtrise d'un nombre important de notions. Il n'est pas certain que les enseignants aient réellement mesuré l'ampleur et la complexité des notions physiques, métaboliques et physiologiques qu'elle soulevait.

À la fin de leur projet nous avons posé trois questions aux enseignants, leurs réponses sont résumées dans le Tableau n°3 en page suivante. Les réponses à ce questionnaire et l'analyse des séances de classes démontrent une maîtrise scientifique partielle des savoirs autour de cette question de la perte de masse. Des imprécisions apparaissent comme la confusion entre matière et énergie (**P**), la méconnaissance du bilan de la respiration cellulaire (**G** et **P**), du rôle de l'hygrométrie sur la vitesse d'évaporation de l'eau (**J**) et de l'intensité des échanges gazeux (**G** et **J**), l'oubli d'un témoin (œuf commercial ou infertile) dans la mesure des masses des œufs (**G** et **P**)... Ces manques influenceront les choix didactiques des enseignants et conduiront quelquefois à des approximations scientifiques autour de l'explication finale qui sera donnée à cette question. Pour **P** par exemple, la

masse devait diminuer car il considérait cette baisse comme un indicateur fiable de bon développement embryonnaire. Or, un œuf commercial incubé subit une perte de masse similaire.

P	<p>1 Pour utiliser les données afin de construire des courbes et éventuellement les interpréter.</p> <p>1 Pour les amener à utiliser la balance Roberval ou électronique, réinvestir les notions de mesures de masses abordées au cycle 2 dans le cadre d'un problème scientifique, les sensibiliser au problème de la tare, de la nécessité de réaliser des mesures de masses précises dans le contexte d'une démarche scientifique (suivi d'un élevage)...</p> <p>2 Pour aborder le concept d'oviparité : l'embryon se nourrit à partir des seules réserves de l'œuf.</p> <p>2 Pour illustrer le phénomène de respiration cellulaire : dégradation des nutriments en présence d'O₂ et production de CO₂ et de vapeur d'eau.</p> <p>3 Pour mettre en évidence les échanges gazeux à travers la coquille.</p>
J	<p>1 Pour aborder le concept d'oviparité : l'embryon se nourrit à partir des seules réserves de l'œuf.</p> <p>2 Pour mettre en évidence les échanges gazeux à travers la coquille.</p> <p>2 Pour mettre en relation la variation de la masse avec la porosité de la coquille.</p> <p>2 Pour mettre en relation la variation de la masse de l'œuf avec l'observation de l'œuf par mirage (augmentation du volume de la chambre à air).</p> <p>2 Pour illustrer le phénomène de respiration cellulaire : dégradation des nutriments en présence d'O₂ et production de CO₂ et de vapeur d'eau.</p> <p>3 Pour les amener à utiliser la balance Roberval ou électronique, réinvestir les notions de mesures de masses abordées au cycle 2 dans le cadre d'un problème scientifique, les sensibiliser au problème de la tare, de la nécessité de réaliser des mesures de masses précises dans le contexte d'une démarche scientifique (suivi d'un élevage)...</p> <p>4 Pour s'assurer du bon développement de l'embryon en suivant un des seuls paramètres à notre disposition : la masse de l'œuf.</p>
G	<p>1 Pour illustrer empiriquement le phénomène de conservation de la masse au cours de transformations métaboliques dans un système quasi clos (<i>compléter d'un exemple avec une boule de pâte à modeler: la forme change, pas la masse</i>).</p> <p>2 Pour les amener à utiliser la balance Roberval ou électronique, réinvestir les notions de mesures de masses abordées au cycle 2 dans le cadre d'un problème scientifique, les sensibiliser au problème de la tare, de la nécessité de réaliser des mesures de masses précises dans le contexte d'une démarche scientifique (suivi d'un élevage)...</p> <p>3 Pour mettre en évidence les échanges gazeux (l'évaporation d'eau) à travers la coquille.</p> <p>3 Pour mettre en relation la variation de la masse avec la porosité de la coquille.</p> <p>4 Pour mettre en relation la variation de la masse de l'œuf avec l'observation de l'œuf par mirage (augmentation du volume de la chambre à air).</p>

Tableau n°2 : Classements des objectifs notionnels et méthodologiques visés par les enseignants **P (CM2)**, **J (CE2)** et **G (CE1/CE2)** au cours de ce travail.

Les réponses sont données et classées par les enseignants par ordre d'importance, « **1** » étant l'objectif principalement recherché.

<p>1- « En initiant ce projet, étiez-vous a priori convaincu de la diminution de la masse de l'œuf au cours de l'incubation ? »</p> <p>P : Oui, car c'est un projet que j'ai déjà mené deux fois.</p> <p>J : Non, j'aurais dit que la masse serait stable car je pensais les échanges gazeux en équilibre.</p> <p>G : Non, et en plus je ne m'étais jamais posé la question !</p>
<p>2- « Si non, comment l'avez-vous appris ? »</p> <p>J : Par mes lectures documentaires pour préparer le projet ce qui a provoqué l'intérêt d'aborder cette question non évoquée dans les I.O. en ces termes.</p> <p>G : Par mes discussions avec des spécialistes en sciences.</p>
<p>3-« À présent, comment expliquez-vous la diminution de la masse de l'œuf durant l'incubation? »</p> <p>P : La masse des œufs devrait rester invariante car il y a consommation de vitellus/albumen par le poussin; or le poussin consomme de l'énergie pour vivre et se développer, du coup les réserves sont transformées en calories et donc la masse de l'œuf diminue: les organes qui commencent à fonctionner transforment la nourriture en énergie.</p> <p>J : Par le fait qu'il y a des échanges gazeux, de la transpiration, de la perte d'eau, de l'œuf vers l'extérieur.</p> <p>G : La masse devrait rester la même car tout est transformé, il y a transformation des matières. Mais il y a diminution de la masse car de l'humidité s'évapore de l'œuf car la coquille est poreuse.</p>

Tableau n°3 : Réponses des enseignants **P (CM2)**, **J (CE2)** et **G (CE1/CE2)** aux questions posées en fin de projet sur l'interprétation de la variation de la masse des œufs avant et après la réalisation de la séquence.

Ces notions sont-elles à la portée des élèves de cycle 3 ?

Si les enseignants n'ont pas la maîtrise totale de ces notions, il est évident que la difficulté fera obstacle pour les enfants. Le principal problème est celui de la conservation de la matière au cours de la transformation métabolique du blanc+jaune en poussin. En effet, il n'est pas facile pour un enfant de cet âge de concevoir qu'une matière en transformation physique et métabolique ne perd pas sa masse au sein d'un système clos. La tentative de **G** de modéliser cette transformation avec de la pâte à modeler s'est d'ailleurs soldée par un échec, tant les obstacles étaient importants, notamment ceux concernant les arguments d'équivalence et de réversibilité. Lhoste & Peterfalvi (2009) rappellent néanmoins que les problèmes relatifs aux notions complexes de transformation métabolique de la matière pourraient être précisés sur une durée curriculaire plus longue et nourris par les connaissances acquises dans d'autres disciplines : la maîtrise des mécanismes liés aux changements d'états de la matière, en physique, ou des processus liés aux réactions chimiques, en chimie, serait certainement utile pour interroger plus finement la compréhension des processus métaboliques en jeu dans un développement embryonnaire ovipare.

Citons un autre problème qui peut faire obstacle à la compréhension de ce phénomène : les gaz qui sortent et entrent sont invisibles et donc une difficulté supplémentaire survient

dans l'appréciation des déplacements de matière entre l'intérieur et l'extérieur : « *Si c'est invisible, ça ne pèse rien* ». Laugier (2004) rappelle ainsi que « *la construction de cette reconnaissance de la matérialité de l'air par des enfants de 8 – 9 ans ne pourra être que lente et progressive.* » Plé (1997) insiste également sur l'existence d'obstacles épistémologiques qui entravent la construction du concept de transformation de la matière chez les élèves de l'école élémentaire, en particulier « l'eau s'évapore en air », mais aussi « l'air n'est pas de la matière ».

La maîtrise de savoirs scientifiques est-elle un préalable à la mise en œuvre d'une démarche d'investigation ?

La question est, bien entendu, provocatrice mais elle méritait d'être posée au vu de la maîtrise quelquefois très partielle des notions par les enseignants. Cependant, et cela peut paraître paradoxal, malgré ces connaissances approximatives, les élèves ont bien été placés en situation d'investigation pertinente. On pourrait même aller plus loin, en disant que c'est justement le manque de connaissances qui a permis à ces enseignants de proposer une démarche qui avait sa cohérence interne basée sur le syllogisme suivant : les réactions métaboliques (et donc conséquentes d'un développement embryonnaire) produisent les gaz H₂O et CO₂ (prémisse majeure). Or, la porosité de la coquille est responsable de la « fuite » des gaz impliqués dans le métabolisme (prémisse mineure) ; donc la perte de masse est un indicateur du développement embryonnaire (conclusion). Ainsi, pour **P**, le témoin (l'œuf non fécondé) est sans intérêt puisque, a priori, privé de métabolisme ; il ne peut donc être l'objet de ces échanges. La comparaison n'a donc de sens qu'entre les états de développement d'un même œuf.

La parfaite connaissance des mécanismes de déshydratation qui touchent aussi bien les œufs fécondés que non fécondés invalide la prémisse majeure qui laisse entendre que l'eau qui s'échappe n'est que d'origine métabolique, et donc la pertinence même de cette pesée puisqu'elle n'aurait abouti à aucune différence notable. On peut ainsi penser qu'un enseignant très au fait des données scientifiques n'aurait pas jugé utile de proposer cette pesée. Pesée qui, pourtant, est génératrice d'investigation puisqu'elle conduit à la mise en évidence du concept de porosité, généralise le concept de respiration et renforce celui de matérialité des gaz. Autant d'objectifs dont on ne peut nier l'intérêt et pourtant introduits sur la base d'une prémisse fautive. En se privant de cette pesée, et de toutes les questions qu'elle va susciter, la conséquence aurait été de ne pas introduire la réflexion sur le métabolisme et donc des échanges respiratoires d'un être ovipare en développement. Si l'ovule reste une cellule vivante, son métabolisme n'en est pas moins très différent de celui de l'œuf, ce que révèle l'analyse fine des échanges gazeux. Une même apparence phénoménologique cache en réalité des mécanismes très différents puisque, au-delà des flux, c'est bien l'origine de l'eau qui s'évapore (métabolique ou solvant passif) qui est en jeu. Alors, faut-il sacrifier une investigation extrêmement riche sur l'autel du canon scientifique ? La comparaison entre œuf fécondé et œuf non fécondé, aussi pertinente soit-elle sur le plan scientifique, renvoie à une référence au témoin qui n'a finalement pas beaucoup d'intérêt ici. L'investigation porte sur les étapes de l'incubation et non sur une comparaison entre évolution de la masse d'un œuf fécondé et non fécondé placés en conditions d'incubation. L'évolution de la masse du seul œuf fécondé a alors du sens, ramenée au strict cadre de la problématique introduite d'abord implicitement, puis explicitement à la suite des réflexions des élèves : la masse de l'œuf augmente-t-elle avec le développement de l'embryon ? Si la maîtrise des savoirs scientifiques est

importante et nécessaire pour ne pas introduire des notions erronées, la maîtrise de la concision de la problématique ne l'est pas moins.

Conclusion

Au regard de tous ces obstacles qui peuvent empêcher la compréhension du phénomène de diminution de masse des œufs au cours de l'incubation, on peut opposer des arguments qui justifient de questionner malgré tout les élèves sur ce point. En effet, cette question a amené les enfants à s'interroger sur des notions telles que la conservation de la masse (**G**), le concept d'oviparité (**G**, **J** et **P**), la relation entre croissance et développement (**G**, **J** et **P**), la fonction de nutrition, et en particulier digestion et respiration (**J** et **P**) ou encore la matérialité des gaz (**J** et **G**). D'un point de vue méthodologique, les élèves ont été invités à mobiliser des compétences liées à la mesure d'une grandeur (masse), au traitement de données graphiques, mais aussi à se familiariser avec quelques éléments de la démarche d'investigation (formulation d'hypothèses, causalité, élaboration d'un protocole, rigueur des mesures, interprétation des résultats et confrontation aux hypothèses de départ...). Autant de questions heuristiques qu'une prémisse exacte, énoncée dans une problématique de comparaison d'évolution des masses au cours de l'incubation, n'aurait pas suscitées. La question de la transposition didactique reste donc bien posée, tant sur le plan notionnel (choix de notions nécessaires) que méthodologique (énoncé du cadre qui donne sens à la problématique).

C'est bien dans un cadre d'intégration des sciences que cette problématique a pu être explorée. L'évolution de la masse d'un œuf embryonné n'a de sens que rapportée aux échanges métaboliques. Ces derniers font références à des échanges gazeux à travers la paroi poreuse. L'évolution de la masse a pu être mise en évidence par un protocole de mesure et de recueil de données rigoureusement mis en application. Enfin, c'est bien parce qu'il y a eu élaboration d'un cahier des charges qui a permis la construction des incubateurs que cette évolution a pu être suivie. Cette problématique n'appartient pas au domaine de la biologie, de la physique, des mathématiques ou de la technologie mais à l'intégration de l'ensemble de ces disciplines. Cette intégration, qui donne tout son sens à la démarche, rend d'autant plus nécessaire une analyse préalable de la progression afin que les différentes étapes prennent sens pour les élèves.

Références bibliographiques

- AKYUREK H. & OKUR A. (2009) Effect of storage time, temperature and hen age on egg quality in free-range layer. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, n°10, 1953-1958.
- BIDEAUD J., HOUDE O., PEDINIELLI J.L. (1994) *L'Homme en développement*. pp. 41-42, Presses Universitaires De France – PUF, Collection : Premier cycle.
- CHEVALLARD Y. (1985) *La transposition didactique, du savoir savant au savoir enseigné*. Grenoble : Éditions La Pensée Sauvage.
- COQUIDE M., FORTIN C., RUMELHARD G. (2009) L'investigation : fondements et démarches, intérêts et limites. *ASTER*, n°40, 51-77.

- DROUARD F. (2008) La démarche d'investigation dans l'enseignement des sciences. *Grand N*, n° 82, 31-51.
- FABRE M. & ORANGE C. (1997) Construction des problèmes et franchissements d'obstacles. *ASTER*, n° 24, 37-57.
- LAUGIER A. (2004) Mettre en œuvre la démarche d'investigation : la matérialité de l'air au cycle 3. *Grand N*, n° 74, 77-98.
- LHOSTE Y., PETERFALVI B. (2009) Problématisation et perspective curriculaire en SVT : l'exemple du concept de nutrition. *ASTER*, n°49, 79-108.
- MEN (2002) *Enseigner les sciences à l'école, cycle 3*. Scérén, CNDP.
- MORGE L. & BOILEVIN J-M. (2007) *Séquences d'investigation en physique-chimie, recueil et analyse de séquences issues de la recherche en didactique des sciences*. Clermont-Ferrand : Scérén et CRDP d'Auvergne.
- ORANGE C. (2005) Problématisation et conceptualisation en sciences et dans les apprentissages scientifiques. *Les Sciences de l'éducation, Pour l'ère nouvelle*, 38, 69-93.
- PLE E. (1997) Transformation de la matière à l'école élémentaire : des dispositifs flexibles pour franchir les obstacles. *ASTER*, n°24, 203-229.
- SAUVEUR B. (1988) *Reproduction des volailles et production d'œufs*. Collection INRA, n°14, 402-405, Éditions Quae.

Annexe n°1

Les résultats sont exprimés en grammes (g) ; les valeurs exprimées en % ne sont ni calculées ni utilisées par les élèves, elles correspondent au % de perte de masse par rapport aux 1ères mesures. En classe, l'évolution de la masse des œufs sera donc discutée en g et non en %.

Variation de la masse des œufs au cours de l'incubation							
Classe	Œuf n°	Durée d'incubation					
Classe de P		0 jour	4 jours	7 jours	9 jours	14 jours	19 jours
	Œuf n°13	-	53g (0%)	52g (2%)	52g (2%)	-	-
	Œuf n°33	-	59g (0%)	59g (0%)	58g (2%)	57g (4%)	55g (7%)
Classe de J		0 jour	3 jours	7 jours	10 jours	14 jours	17 jours
	Œuf n°1	50g (0%)	50g (0%)	48g (4%)	48g (4%)	46g (8%)	44g (12%)
	Œuf n°2	60g (0%)	60g (0%)	58g (3%)	57g (5%)	55g (8%)	54g (10%)
	Œuf n°3	48g (0%)	47g (2%)	47g (2%)	46g (4%)	44g (8%)	43g (10%)
	Œuf n°4	52g (0%)	51g (2%)	49g (6%)	48g (8%)	46g (11%)	45g (13%)
	Œuf n°5	39g (0%)	39g (0%)	38g (3%)	36g (8%)	35g (10%)	34g (13%)
	Œuf n°6	56g (0%)	55g (2%)	54g (4%)	53g (5%)	50g (11%)	48g (14%)
Classe de G		0 jour	-	-	-	14 jours	-
	Œuf n°1	33g (0%)	-	-	-	26g (21%)	-
	Œuf n°2	63g (0%)	-	-	-	61g (3%)	-

Annexe n°2

Questionnaire proposé aux trois enseignants à la fin du projet pour qu'ils hiérarchisent les objectifs qu'ils pensaient avoir visés quand ils interrogeaient les élèves sur la variation de masse de l'œuf pendant l'incubation

- q Pour aborder le concept d'oviparité : l'embryon se nourrit à partir des seules réserves de l'œuf.
- q Pour approfondir ce concept et dépasser la définition minimale d'« animal qui pond des œufs ».
- q Pour mettre en évidence les échanges gazeux à travers la coquille.
- q Pour illustrer le phénomène de respiration cellulaire : dégradation des nutriments en présence d'O₂ et production de CO₂ et de vapeur d'eau.
- q Pour s'assurer du bon développement de l'embryon en suivant un des seuls paramètres à notre disposition : la masse de l'œuf.
- q Pour illustrer empiriquement le phénomène de conservation de la masse au cours de transformations métaboliques dans un système quasi clos.
- q Pour mettre en relation la variation de la masse de l'œuf avec l'observation de l'œuf par mirage (augmentation du volume de la chambre à air).
- q Pour mettre en relation la variation de la masse avec la porosité de la coquille.
- q Pour utiliser les données afin de construire des courbes et éventuellement les interpréter.
- q Pour les amener à utiliser la balance Roberval ou électronique, réinvestir les notions de mesures de masses abordées au cycle 2 dans le cadre d'un problème scientifique, les sensibiliser au problème de la tare, de la nécessité de réaliser des mesures de masses précises dans le contexte d'une démarche scientifique (suivi d'un élevage)...