



HAL
open science

Faire et refaire : varier les paramètres d'une expérience pour formuler une loi plus robuste

Estelle Blanquet, Eric Picholle

► To cite this version:

Estelle Blanquet, Eric Picholle. Faire et refaire : varier les paramètres d'une expérience pour formuler une loi plus robuste. Brigitte Amory et Thierry Evrard. Réveille-moi les sciences! Apprendre les sciences de 2 1/2 à 14 ans, De Boeck, 2012, 978-2804171391. hal-01349747

HAL Id: hal-01349747

<https://hal.science/hal-01349747v1>

Submitted on 28 Jul 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Faire et refaire : varier les paramètres d'une expérience pour formuler une loi plus robuste

Estelle Blanquet^{1,2} & Eric Picholle³

1. Université de Nice Sophia-Antipolis, IUFM de Nice, 43 avenue Stephen Liégeard France
2. Laboratoire de Didactique et d'Epistémologie des Sciences, Université de Genève, Suisse
3. CNRS UMR 7336, LPMC, Université de Nice Sophia-Antipolis, France

adresse de correspondance : Estelle.Blanquet@unice.fr

« *Faire et refaire, c'est toujours travailler* », assure la sagesse populaire. Les enseignants le savent mieux que quiconque : répéter une leçon, un discours, une activité, a de tout temps été une pratique courante à l'école, et d'autant plus qu'on s'adresse à de plus jeunes enfants. Au cours d'une même leçon, à quelques jours d'intervalle ou même d'une année à l'autre, ceux-ci sont amenés à faire et refaire plusieurs fois la même activité (à l'identique ou non). Les activités scientifiques, en particulier, « *s'y étendent souvent sur une période assez longue et cela est conforme aussi bien à la pédagogie des situations-problèmes (à partir desquelles on cherche à dégager notions et méthodes scientifiques), qu'à l'idée d'une "pédagogie spiralaire" et à celle – subordonnée – d'une reprise des mêmes acquis à différents niveaux d'enseignement* »¹. Les plus récents programmes français pour les sciences expérimentales proposent aujourd'hui de travailler un même thème en l'approfondissant progressivement sur les trois années du cycle 3 (enfants de 8-11 ans)².

Plus spécifiquement, au-delà de l'efficacité pédagogique générale de la répétition, celle des expériences physiques constitue un élément méthodologique essentiel de la science scolaire. Mais fait-on jamais vraiment deux fois la même expérience ?

1. Reproduire une expérience à l'identique (ou pas...)

Cette question, que le scientifique posera en termes de *reproductibilité*, est au cœur de nombreuses réflexions, de la didactique^{3,4} à l'épistémologie^{5,6} en passant par le statut de l'observateur dans le monde quantique. Nous nous contenterons ici de souligner que toute tentative de réponse passe par un choix, celui des éléments d'appréciation qu'on voudra considérer.

Ce choix dépend généralement du contexte. Ainsi, deux billets de 500 € tout neufs paraîtront-ils sinon identiques, du moins *indifférents* à celui qui voudrait s'en servir pour payer son loyer, quand leurs numéros de série distincts constitueront une différence cruciale pour le policier enquêtant sur le cambriolage d'une banque. Certains domaines, comme le "spectacle vivant", mettent leur fierté dans le fait que deux performances du même artiste ne sont jamais strictement équivalentes, quand bien même il respecterait à la lettre, ou à la note près, le même texte et la même partition.

À l'opposé, la méthode scientifique s'attache le plus souvent à ce qui est commun à deux réalisations d'une expérience, plutôt qu'à ce qui les distingue. Dans une expérience de réfraction des rayons lumineux, par exemple, « *les réalisations successives diffèrent à maints égards. Ainsi, la distance de l'appareil à la Lune, peut-être la température de la source lumineuse, la pression atmosphérique, etc. Ce qui est "maintenu identique", c'est simplement un ensemble de conditions.* »⁵ Il s'agit donc, parmi les innombrables paramètres susceptibles de caractériser une expérience, d'identifier un nombre raisonnable de paramètres *pertinents* (dont la variation en modifie le résultat de façon significative) et le cas échéant, parmi ceux-ci, les paramètres *cruciaux* (susceptibles de le changer du tout au tout). La validité d'une modélisation repose sur l'identification correcte des paramètres pertinents, tous les autres, de l'influence de la Lune au proverbial âge du capitaine,⁷ étant, par construction, supposés *indifférents*.

Il devient alors possible d'exprimer des *lois*, plus générales que le simple énoncé du résultat d'une expérience particulière, et susceptibles de prédire le résultat d'un grand nombre d'expériences distinctes. Ainsi, un énoncé comme « *l'eau bout à 100°C* » repose sur l'identification de deux paramètres pertinents (la substance et la température), et présente par contraposition comme indifférents tous les autres paramètres (comme la distance à la Lune, la situation géographique de l'école ou le type d'eau employé).

En classe, la démarche d'investigation en physique procède souvent par aller-retours entre général et particulier, entre une loi et des expériences mises en place dans la classe. Selon le sujet considéré, on peut partir d'observations particulières, en inférer (par *induction*, diront les logiciens) des énoncés de lois (plus généraux), et revenir tester ceux-ci dans d'autres cas particuliers ; ou, inversement, partant d'une loi connue ou d'un énoncé proposé par le maître, en déduire le résultat attendu d'une expérience, puis réaliser celle-ci et comparer l'observation au résultat anticipé pour revenir au besoin sur la formulation de la loi.

2. Lois “vraies” ou lois “robustes” ?

Le plus souvent, le physicien professionnel est capable de justifier théoriquement l'élimination de certains paramètres et de préciser le niveau de généralité des lois qu'il formule. « *Nous admettons par exemple que l'état des corps éloignés ne peut avoir d'influence sensible sur les phénomènes terrestres, et cela en effet semble s'imposer mais il est des cas où le choix de ces circonstances pratiquement indifférentes comporte plus d'arbitraire ou, si l'on veut, exige plus de flair* »⁸ explique Henri Poincaré.

L'important est donc moins de savoir si une loi est “vraie” — en toute rigueur, aucune ne l'est jamais absolument, en toute généralité — que de déterminer le domaine dans lequel on pourra l'appliquer. Paradoxalement, c'est même la conscience de ses limites qui permet au scientifique de s'en affranchir en toute confiance⁹. « *C'est l'exception qui confirme la règle* », auraient dit les Anciens.

Idéalement, pour identifier le domaine d'application d'une loi, il faudrait donc tester l'influence de tous les paramètres possibles et imaginables. C'est bien sûr impossible. Faudrait-il alors se contenter de ne considérer que ceux explicites dans l'énoncé ? Un moyen terme consiste à refaire l'expérience plusieurs fois en faisant varier arbitrairement quelques paramètres présumés indifférents.

De deux choses l'une : soit tous les nouveaux résultats obtenus par ces nouvelles expériences restent compatibles avec la loi considérée, et tout va bien ; soit elle s'avère incapable de rendre compte de certains, et donc "fragile", au sens où une petite variation du contexte suffit à l'invalider.

Nous définirons donc *a contrario* comme "robuste" une loi qui reste valide dans des contextes variés, faisant intervenir différents paramètres que cette loi présume comme indifférents et différentes valeurs de ces paramètres.

S'il est facile d'établir rigoureusement la fragilité d'une loi, la notion de "robustesse" n'est pas univoque, dans la mesure où on ne peut jamais la tester que sur un ensemble limité de paramètres et de circonstances, choisis arbitrairement par l'expérimentateur. Et pour ceux-là mêmes, « *Sommes-nous absolument sûrs qu'elles sont sans importance ? Évidemment non. Cela pourra être vraisemblable, cela ne pourra pas être rigoureusement certain* »¹⁰. L'histoire des sciences regorge de lois longtemps tenues pour robustes, et qui ont trouvé les limites de leur pertinence au hasard d'une expérience *a priori* sans rapport.

Pour autant, pour la communauté scientifique en général comme à l'école, il faut savoir aller de l'avant en dépit de ces incertitudes et faire confiance, au moins provisoirement, à certaines lois. Le test préalable de leur robustesse permet d'éliminer les mauvaises surprises¹¹ trop prévisibles et de fonder au moins sa confiance sur un pari raisonné, d'autant plus que ces tests auront été plus systématiques.

3. Importance de l'énoncé

Il est important de noter que la notion de robustesse étant intimement liée à celle de paramètres, pertinents ou indifférents, elle dépend fortement de l'énoncé exact de la loi examinée : plus l'énoncé sera général, plus il présupposera de paramètres indifférents, et plus il courra de risques d'échouer à un test de robustesse. De même, plus ses prédictions seront précises, moins elles seront robustes. Or généralité et précision sont, pour une loi, des caractéristiques tout aussi souhaitables que la robustesse. Il s'agira donc de formuler l'énoncé présentant l'équilibre optimal, avec la plus grande généralité et la plus grande précision compatibles avec une robustesse raisonnable.

Ainsi, revenons un moment sur l'énoncé : « *L'eau bout à 100° C* ». Il est à la fois très précis (100°, ce n'est ni 99,9°, ni 100,1°) et très général (seule la nature du liquide est contrainte). De nombreux paramètres réputés indifférents sont donc disponibles pour tester sa robustesse : la température d'ébullition dépend-elle du type d'eau (du robinet, minérale, plate ou gazeuse..) ? Du moment de la journée où l'on fait la mesure ? De l'endroit ? Du temps ou de la puissance de chauffe ? Et là, *Patatras !* On s'apercevra vite que l'énoncé est souvent mis en défaut et ne peut donc être considéré comme robuste.

Prenons l'exemple de l'endroit où l'on fait la mesure, test de robustesse bienvenu si la classe correspond avec une classe de même niveau à l'autre bout du pays, ou si une sortie en altitude est prévue. On se convaincra aisément que, toutes choses égales par ailleurs, l'eau ne bout pas *exactement* à la même température en deux endroits éloignés. Un énoncé du type « *L'eau bout à 100° C dans notre classe* », bien que moins général, sera donc préférable. Ou mieux encore, si l'on a pu comparer aussi nos résultats avec ceux d'autres classes de la même école, ou d'autres écoles de la même ville : « *L'eau bout à 100° C dans notre école / notre ville* ».

Considérons maintenant l'énoncé que l'on trouve dans les manuels : « *L'eau pure bout à 100°C au niveau de la mer* ». Outre le fait qu'il n'est pas forcément aisé à tester avec les élèves (c'est plus facile pour les petits niçois...), et qu'il nécessite de maîtriser le concept de "pureté", il est moins général encore : la loi ne s'applique alors plus qu'à une catégorie d'eau spécifique, l'eau pure, et en certains lieux bien définis.

Pour autant, il n'est pas non plus d'une robustesse à toute épreuve. En effet, l'intégration d'une prédiction chiffrée (100°) dans un énoncé soulève, d'une part, des problèmes d'instrumentation (quelle fiabilité accorder au choix de l'instrument de mesure utilisé ? Deux thermomètres différents plongés dans une même casserole d'eau bouillante pouvant fournir des indications différentes. Leur lecture par deux observateurs différents peut conduire à des résultats différents) ; et d'autre part des problèmes de précision.

En pratique, des élèves faisant bouillir de l'eau en classe vont trouver toute une gamme de valeurs entre 98 et 100°C¹². Inversement, des métrologues professionnels obtiendront une mesure extrêmement précise — mais qui ne sera pas non plus 100,000°C (même au niveau de la mer, les conditions de température et de pression ne sont jamais exactement "normales"). L'énoncé des manuels n'est donc jamais vérifiable (et *a fortiori* non robuste). Un bémol y remédiera aisément : « *L'eau pure bout aux environs de 100° C dans notre ville* » est en revanche un énoncé aisément vérifiable particulièrement robuste (en admettant bien sûr, pour simplifier, que la ville se trouve bien au niveau de la mer).

4. Démarche d'investigation

Les programmes scolaires français préconisent aujourd'hui l'emploi de la démarche d'investigation pour enseigner les sciences à l'école primaire. C'est avant tout une façon d'induire un questionnement et de le laisser se développer, spontanément mais dans un cadre soigneusement chorégraphié, en encourageant tout à la fois la discussion entre pairs, pour élaborer des réponses, et le recours systématique à l'expérience pour éprouver les propositions des uns et des autres¹³. L'enseignant se fait donc guide et accoucheur, plutôt que figure d'autorité détentrice du savoir comme dans des pédagogies plus frontales.

Une séquence en démarche d'investigation en physique aborde expérimentalement une thématique ou un objet technique pour en identifier les ressorts. À chaque étape, la classe se met d'accord sur des énoncés particuliers qui rendent compte des résultats trouvés. La séquence aboutit idéalement à la formulation d'énoncés plus généraux en rapport avec le programme.

Toutefois, ce processus ne bénéficiant pas, comme dans une pédagogie plus frontale, de la caution d'un arrière-plan théorique fourni par le maître, les lois ainsi produites se révèlent souvent fragiles. Une difficulté supplémentaire est l'insuffisante maîtrise de la langue par les enfants. Même lorsqu'ils ont bien compris les phénomènes étudiés, leurs énoncés n'expriment pas toujours exactement leur pensée.

Il est donc particulièrement important de tester systématiquement leur robustesse et de ne les valider qu'une fois trouvée une formulation satisfaisante. Le rôle de l'enseignant est alors fondamental : à lui d'attirer l'attention des élèves sur le fait que l'élaboration d'un loi n'est pas une fin en soi et qu'une loi fragile n'a aucune utilité ; et éventuellement d'orienter astucieusement le choix des paramètres à tester.

Si la séquence a été bien menée et qu'un grand nombre d'hypothèses ont été dûment expérimentées, l'énoncé a toutes les chances de s'avérer robuste. Tout va bien et on peut clore la séquence. Cela ne signifie pas nécessairement que le sujet est épuisé ; on sera amené à l'approfondir à plusieurs reprises au cours de la scolarité.

Mais, l'énoncé peut s'avérer fragile. Le plus souvent, il s'agit d'un problème de formulation anticipé par l'enseignant et qu'un travail sur le langage permettra de résoudre comme on l'a vu dans la section précédente. Il arrive toutefois que la loi trouvée soit purement et simplement fautive. Dans ce cas elle ne saurait être validée et la séquence doit reprendre en développant un questionnement spécifique sur le ou les paramètres sur lesquels le test de robustesse a buté.

5. Un cas d'école maternelle

La notion abstraite de robustesse d'une loi et les exigences méthodologiques afférentes ne sont pleinement accessibles qu'aux élèves ayant déjà une idée de la nature de la science, souvent née d'une solide pratique de la démarche d'investigation — typiquement, des collégiens ou de bons élèves de cycle 3. Pour autant, c'est en forgeant qu'on devient forgeron, et il est non seulement possible, mais très bienvenu de travailler ces éléments de méthode plus tôt, y compris avec des tout-petits¹⁴.

Ce travail est d'autant plus facile avec des jeunes enfants qu'ils prennent plaisir à refaire plusieurs fois la même activité et se font un jeu de toute pratique nouvelle. L'enseignant n'a donc pas à s'inquiéter d'une baisse de leur motivation au cours des tests.

Nous développerons ici l'exemple d'une séquence construite autour de *Plouf!*, de Philippe Corentin^{15,16}. Cet album met en scène différents personnages (un loup, un cochon, des lapins) se retrouvant successivement au fond d'un puits, dont on peut réaliser en classe un modèle analogique avec une corde et une poulie¹⁷.

Au fil de leurs investigations, des élèves de maternelle (MS-GS, de 4 à 6 ans) sont arrivés à formuler un énoncé du type¹⁸ : « *lorsqu'on accroche des objets de part et d'autre d'une corde posée sur une poulie, le plus lourd descend et le plus léger remonte* ». Ils ont identifié les deux seuls paramètres pertinents¹⁹ pour le fonctionnement du dispositif technique : le poids des objets suspendus de part et d'autre de la poulie. Implicitement, tous les autres — la couleur des objets, leur forme, leur nombre, etc. — sont réputés indifférents. L'enseignant n'a donc que l'embarras du choix pour tester avec les élèves la robustesse de la loi correspondante.

5.1 Des poids et des couleurs

Le plus simple, pour permettre aux enfants de s'approprier cette notion lors de leurs premières démarches d'investigation, est de tester d'abord un paramètre que l'enseignant sait effectivement indifférent, comme la *couleur* des objets que l'on suspend. Il peut alors leur expliquer que l'on va vérifier si la « règle » que l'on a trouvée « marche bien ». Il leur présente des objets de différentes couleurs mais, à ce paramètre près, identiques à l'un de ceux qu'ils ont déjà manipulés. En les manipulant librement, les élèves se convainquent en particulier que leur poids est le même. Lorsque l'enseignant leur demande ce qui se passera si l'on refait l'expérience en remplaçant l'objet connu par un autre de couleur différente, ils

n'ont aucune difficulté à répondre que le résultat sera inchangé. Ils en sont sûrs, puisque *c'est le plus lourd qui descend*.

C'est une application directe, et correcte, de l'énoncé précédemment construit par la classe. On pourrait s'en satisfaire et arrêter là la leçon. Mais c'est précisément le moment crucial où l'on peut facilement ajouter à l'apprentissage sur le contenu (le fonctionnement d'une poulie) un apprentissage méthodologique (tester la robustesse). En effet, l'enseignant peut jouer les naïfs : *comment le savent-ils ?* Les élèves se réclament alors des expériences précédentes et s'accordent à affirmer que la couleur « ne compte pas ». Mais de nouveau, *comment le sait-on ?* La classe l'a-t-elle vérifié ? Ce n'est pas le cas, les enfants le reconnaissent. Une nouvelle expérience s'impose donc, avec les nouveaux objets. Les élèves sont ravis de constater que leur énoncé n'est pas mis en défaut : « *Maître, on te l'avait bien dit !* ». À lui de d'enfoncer le clou. *Avant* les élèves pensaient que la couleur n'avait pas d'importance, *maintenant* on l'a vérifié. *Avant*, on ne savait pas vraiment si notre énoncé s'appliquait à des objets différents, *maintenant* on en est sûr et on peut l'utiliser en confiance.

Si certains élèves rebondissent sur cette idée en relevant qu'on n'a pas non plus testé tel ou tel autre paramètre, c'est gagné : ils ont raison, on le teste à son tour, et on est *de plus en plus sûr* de notre énoncé. Cela devient vite un jeu (en même temps qu'une « bonne pratique » scientifique, même si on ne le posera pas en ces termes avec les petits), une fois que les élèves se sont appropriés le procédé.

5.2 Robustesse vs. notions connexes

Le test de la robustesse d'une loi énoncée au terme d'un exercice particulier peut aussi être l'occasion d'entreprendre, ou de poursuivre, un travail sur un autre sujet. Ainsi, à la maternelle, la notion de poids est en cours de consolidation et les petits ont encore du mal à la distinguer de celles de taille, *a fortiori* de volume. Pour beaucoup, plus un objet est gros, plus il est lourd.

L'énoncé de notre loi est sans ambiguïté : le paramètre pertinent est bien le poids. Vérifier sa robustesse au regard du volume, en testant le comportement des objets de volume distinct mais de même poids, peut donc illustrer de façon utile la différence entre les deux notions.

Dans la mesure où l'on sait être ici confronté à une conception initiale bien ancrée dans l'esprit des élèves, des précautions particulières sont toutefois nécessaires pour éviter le parasitage de ce travail et le risque d'une mauvaise interprétation des observations, qui ne ferait que renforcer la conception fautive. L'utilisation de boîtes en plastique transparentes, de volumes différents, très légères, que l'enseignant peut remplir d'une même quantité de sable peut faire l'affaire : les élèves voient bien qu'elles ont toutes presque le même poids pour des volumes très différents, ou s'en convainquent facilement si le maître doit le souligner.

Il est possible d'aller plus loin et d'engager un travail spécifique, celui sur la robustesse de la première loi donnant lieu à une nouvelle démarche d'investigation complète sur une conception initiale que l'on souhaite déstabiliser.

Ainsi, une grosse boule de polystyrène et une petite bille en acier nettement plus lourde permettent de secouer la conception initiale « plus c'est gros, plus c'est lourd ». Laquelle

est la plus lourde ? Les élèves les soupèsent. C'est la bille mais elle est si petite que les élèves ne sont pas convaincus. La conception initiale jusque là muette apparaît. Le dispositif va la mettre en défaut. La bille descend et on a vérifié auparavant que le volume n'intervenait pas, c'est donc qu'elle est plus lourde que la boule de polystyrène. Ce n'est pas forcément parce qu'un objet est plus gros qu'il est plus lourd.

Toutefois, un unique contre-exemple ne suffit pas pour déstabiliser durablement une conception initiale confortée par l'expérience commune des petits : une grosse boule de pâte à modeler est plus lourde qu'une petite, etc. Ce qui compte pour savoir quand associer ou non gros à lourd, c'est la matière des objets. La notion de densité pourrait les aider à faire le tri mais elle ne fait pas partie de leur boîte à outils conceptuelle. L'enseignant peut alors proposer de tester de nombreux lots d'objets différents de volumes et poids choisis à dessein pour asseoir cette distinction entre gros et lourd.

CONCLUSION

De l'école maternelle au laboratoire de recherche, faire et refaire plusieurs fois la même expérience, ou des expériences très proches, répond donc à une double nécessité : s'assurer de la reproductibilité des résultats particuliers obtenus, mais aussi de la robustesse des lois plus générales qu'on peut en inférer.

Si les petits prennent souvent plaisir à de telles répétitions et s'en font volontiers un jeu, elles peuvent paraître excessivement contraignantes, voire relever de la corvée, aux plus grands pressés de conclure. Pour autant, elles constituent un élément essentiel de la démarche scientifique expérimentale, de « bonnes pratiques » dont on ne saurait s'affranchir sans diminuer significativement la fiabilité de ses conclusions.

On peut aller plus loin et considérer la présence de tests de reproductibilité et de robustesse comme des *critères objectifs de scientificité*²⁰ d'une démarche expérimentale : leur existence ne suffit pas à garantir qu'une démarche est scientifique (et d'autant moins que, comme on l'a vu, la notion de robustesse d'un énoncé repose sur un compromis, un pari raisonné) ; mais leur absence permet de mettre en cause sa scientificité, dans la mesure où elle montre que l'expérimentateur en cause est prêt à se contenter de résultats peu fiables et à prendre le risque de généralisations abusives, que ce soit par désinvolture ou, pire, faute d'en percevoir l'enjeu.

Nous n'entrerons pas plus avant, dans ce court article, dans des considérations qui nous amèneraient rapidement à nous interroger sur la nature même de la science scolaire^{21,22}. Nous nous contenterons donc, en guise de conclusion, de réaffirmer que l'éducation à la méthodologie scientifique de base est une part essentielle de la formation en sciences : non seulement, il n'est jamais trop tôt pour s'en approprier les éléments et adopter de « bonnes pratiques » qui se révéleront utiles tout au long de la scolarité, et bien au-delà ; mais les jeunes enfants, y compris les tout-petits, se révèlent très réceptifs à un discours « carré » sur ces questions. Cela leur permet d'étayer très tôt la construction d'une représentation des sciences moins naïve qu'une simple succession d'étapes stéréotypées²³ et, surtout, plus opératoire.

Un travail explicite sur la robustesse, en particulier, s'intègre aisément à la fin d'une séquence en démarche d'investigation, et permet un travail authentiquement scientifique dès la maternelle.

-
1. Jean-Pierre Astolfi, "Apprendre par franchissement d'obstacles ?". Repères n°5/1992, INRP.
 2. Ministère de l'Éducation Nationale (France). Bulletin Officiel du 5 janvier 2012.
 3. Victor Host (1973). « L'initiation à la méthodologie scientifique : l'étude de la nature », in *Pédagogie fonctionnelle pour l'école élémentaire*, t. 2. Ed. Nathan. Extrait disponible dans l'ouvrage *Comment les enfants apprennent les sciences ?* De Jean-Pierre Astolfi, Brigitte Peterfalvi & Anne Vérin, Ed. Retz, 2006, p. 222.
 4. Gérard De Vecchi (2006). *Enseigner l'expérimental en classe*. Ed. Hachette, pp. 170.
 5. Carl Hempel (1972). « Critères de confirmation et d'acceptabilité », in *Éléments d'épistémologie (Philosophy of Natural Science, 1966)*. Ed. Armand Colin, pp. 51-71.
 6. Ian Hacking (1989). *Concevoir et expérimenter*, trad. B. Ducrest. Ed. Christian Bourgeois, pp. 371-372.
 7. Cet archétype populaire du paramètre indifférent est à double tranchant. Stella Baruk rappelle en effet malicieusement qu'il s'agissait bien, historiquement, d'un paramètre pertinent pour les assureurs maritimes, qui le faisaient intervenir dans le calcul des primes demandées aux armateurs (les assureurs modernes ne procèdent d'ailleurs pas autrement avec les jeunes conducteurs), et donc pour nombre de calculs en faisant intervenir le coût. S. Baruk, *L'Âge du capitaine - de l'erreur en mathématiques*. Ed. Seuil, 1985.
 8. Henri Poincaré (1905). *La Valeur de la science*. Ed. Champs Flammarion, 1970, pp. 177.
 9. Ainsi, selon Bachelard, la géométrie commune, "euclidienne", est-elle d'autant mieux établie aujourd'hui qu'elle n'est qu'un cas particulier justifié d'une "géométrie non euclidienne" plus générale, et non plus une collection d'axiomes. Gaston Bachelard (1940). *Philosophie du non*. Ed. Presses Universitaires de France, 2005.
 10. Henri Poincaré (1902). *La Science et l'hypothèse*. Ed. Champs Flammarion, 1989, pp. 27.
 11. Des scientifiques très respectables sont parfois eux-mêmes tombés, faute de tests de robustesse suffisants, dans ce que le prix Nobel Irving Langmuir nomme la "science pathologique". Un exemple classique est la fameuse affaire des "rayons N" qui agita la communauté scientifique au tout début du siècle dernier. I. Langmuir « Pathological Science », conf. de 1953 ; repris in *Physics Today*, pp. 36-48, 1989.
 12. Et non $100^{\circ} \pm 2^{\circ}$, comme on s'y attendrait peut-être. En pratique, d'expérience, on obtient en effet très rarement des valeurs supérieures à 100° C avec les thermomètres à alcool couramment utilisés à l'école. Les thermomètres à mercure, aujourd'hui interdits dans les écoles françaises, ne présentaient pas ce biais. Les thermomètres à sonde sont quant à eux sujets à une source d'erreur d'une autre nature, liée à la nécessité de les calibrer. Par simplicité, nombre d'enseignants choisissent de le faire dans l'eau bouillante, en lui affectant arbitrairement la température de référence de 100° , que leur classe soit ou non au niveau de la mer, etc. Les spécificités locales sont ainsi gommées et si les élèves retrouvent sans difficulté cette valeur classique au moment des prises de mesure dans les mêmes conditions, en toute rigueur, ils ne peuvent rien en déduire sur la température d'ébullition de l'eau dans la classe.
 13. Blanquet, E. (2010). « Définir et limiter le champ d'une investigation », in *Science à l'école, côté jardin. Le Guide pratique de l'enseignant*. Editions du Somnium.
 14. Cf. l'article « Vrai, pas vrai vs. possible, pas possible : Importance d'une formulation productive pour une investigation à partir d'albums jeunesse » du même auteur dans cet ouvrage.
 15. Philippe Corentin (1990). *Plouf !* Ed. Ecole des loisirs.
 16. La séquence séquence détaillée est disponible dans *Science et fictions à l'école : un outil transdisciplinaire pour l'investigation ?* Actes des premières journées Science-Fiction et enseignement de

l'IUFM de Nice, dir. E. Blanquet & É. Picholle. Editions du Somnium, 2011. Une version est téléchargeable à l'adresse : <http://somniumeditions.free.fr/Somnium/Bonus.html>

17. Blanquet E. & Picholle P. (2012). « Réception et analyse d'une fiction contrefactuelle: une approche de la primauté de l'expérience à l'école maternelle ». Actes des septièmes journées scientifiques de l'ARDIST. Bordeaux, 14-16 mars 2012.

18. Comme toujours avec les tout-petits, il s'agit d'un énoncé largement reformulé par le maître.

19. En toute rigueur, il n'y en a en fait qu'un, mais trop abstrait pour les petits : la *différence* entre les poids des deux objets.

20. Blanquet, E., Picholle, E. (2010). « Les critères de scientificité : un outil pour distinguer sciences et non sciences ? ». Actes des journées scientifiques DIES 2010, dir. Loisy, C., Trgalova, J. et Monod-Ansaldi R., Editions INRP. Accessible sur le site de l'IFE : <http://ife.ens-lyon.fr/publications/edition-electronique/dies2010/06-communications-innovations-pedagogiques/06-2-blanquet-picholle.pdf>

21. Lederman, N. G., Abd-El-Khalick, F., Bell, R. L. & Schwartz, R. S. (2002). Views of nature of science questionnaire : Toward valid and meaningful assessment of learners' conceptions of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(6), 497– 521.

22. Blanquet, E., Picholle, E. (2011). "Is it science we teach in French primary schools? Elementary criteria of scientificity for teachers" *International Workshop on Science Teaching and History&Philosophy of Science*, 23-25 juin, Aarhus, Danemark.

23. Metz, K. E (2004). « Children's Understanding of Scientific Inquiry : Their Conceptualization of Uncertainty in Investigations of Their Own Design ». *Cognition and Instruction*, 22 (2) 219-290.