



**Cégep de la Gaspésie
et des Îles**

CAMPUS DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE

Cahier de méthodologie en sciences de la nature



Avant-Propos

Chers étudiants et étudiantes,

Ce cahier a pour objectif de réunir en un seul document un ensemble de préoccupations communes à toutes les disciplines du programme de sciences de la nature. L'existence de ce cahier permet aux enseignants et enseignantes de vous présenter une vision commune et cohérente du programme de sciences de la nature et vous évite d'avoir à vous adapter à une variété de visions et de consignes méthodologiques. Ce cahier ne remplace pas, mais complète le Cahier de méthodologie du Campus des Îles-de-la-Madeleine en introduisant des éléments spécifiques à votre programme. Les deux cahiers sont complémentaires et utiles pour les étudiants et étudiantes de sciences de la nature.

Le cahier débute par une présentation de la science, de ses caractéristiques, de ses méthodes et de son importance en la situant par rapport aux autres domaines du savoir. Il présente ensuite le programme de sciences de la nature, tel que défini par le ministère de l'Enseignement supérieur du Québec, avec quelques caractéristiques propres à l'implantation du programme au Campus des Îles-de-la-Madeleine. Le cahier présente ensuite les méthodes pour tenir compte des incertitudes de mesure et de leur propagation dans les calculs. Il montre ensuite les normes de présentation des observations et des résultats de mesure et se termine par un guide de rédaction des rapports de laboratoire.

Ce cahier est le fruit d'une collaboration entre les enseignants et enseignantes du programme et beaucoup d'efforts ont été investis afin que son contenu corresponde autant que possible aux exigences de tous et toutes. Toutefois, il est possible qu'à certaines occasions des exigences ou des pratiques pédagogiques diffèrent de celles présentées ici. De plus, le cahier n'a pas la prétention d'être complet et certaines informations importantes peuvent en être absentes. N'hésitez pas à consulter vos enseignants et enseignantes au besoin.

Nous vous souhaitons le meilleur des succès dans votre parcours en sciences de la nature au Campus des Îles-de-la-Madeleine!

Les profs du programme de sciences de la nature

Table des matières

AVANT-PROPOS	1
TABLE DES MATIÈRES	2
1. LA SCIENCE.....	3
1.1 DÉFINITION ET OBJECTIFS	3
1.2 CARACTÉRISTIQUES DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES	3
1.3 VOCABULAIRE SCIENTIFIQUE: DES OBSERVATIONS AUX THÉORIES.....	5
1.4 LES MÉTHODES SCIENTIFIQUES	6
1.5 LES DISCIPLINES SCIENTIFIQUES.....	10
1.6 SCIENCE ET TECHNOLOGIE	11
2. LE PROGRAMME DE SCIENCES DE LA NATURE	13
2.1 FINALITÉ ET BUTS DU PROGRAMME	13
2.2 STRUCTURE DU PROGRAMME	13
2.3 LOGIGRAMME DE COURS	16
2.4 PRÉALABLES	17
2.5 CHOIX DE COURS ET PROFILS.....	18
2.6 ÉPREUVE SYNTHÈSE DE PROGRAMME ET ACTIVITÉS D'INTÉGRATION	18
2.7 INTENTIONS ÉDUCATIVES	20
3. MESURES ET INCERTITUDES	22
3.1 TYPES D'OBSERVATIONS.....	22
3.2 PRÉCISION DES MESURES ET CHIFFRES SIGNIFICATIFS.....	23
3.3 INCERTITUDES ABSOLUE ET RELATIVE	26
3.4 PRÉSENTATION D'UNE MESURE ET DE SON INCERTITUDE.....	28
3.5 PRÉCISION DES INSTRUMENTS DE MESURE	29
3.6 MESURES NON REPRODUCTIBLES.....	32
3.7 CALCULS D'INCERTITUDE.....	33
4. PRÉSENTATION DES OBSERVATIONS ET RÉSULTATS.....	43
4.1 INTRODUCTION.....	43
4.2 TABLEAUX.....	44
4.3 FIGURES	46
4.4 GRAPHIQUES.....	46
4.4 DIAGRAMMES DE COMPARAISON.....	50
4.5 ÉQUATIONS.....	50
5. RÉDACTION D'UN RAPPORT DE LABORATOIRE	51
5.1 IMPORTANCE ET TYPES DE COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES.....	51
5.2 STYLE DE RÉDACTION.....	52
5.3 CONTENU DÉTAILLÉ D'UN RAPPORT DE LABORATOIRE.....	54
6. BIBLIOGRAPHIE.....	60

1. La Science

1.1 Définition et objectifs

Le mot « science » vient du latin *scientia* dont la racine *scire* signifie « savoir » (Robert, 1992, p. 1778). Il existe plusieurs définitions de la science. Une définition largement admise est que la science désigne un ensemble cohérent de connaissances ainsi que la méthode qui permet de les acquérir (Thouin, 2001, p. 7-8). La science n'est possible que si on croit qu'il existe une réalité indépendante de nous et de nos perceptions et que celles-ci sont des représentations fidèles du monde objectif (Barrette, 2006, p. 134). De plus, il faut croire que cette réalité est intelligible, c'est-à-dire qu'il est possible de la connaître. Ces croyances ne peuvent être démontrées scientifiquement. Elles sont des prérequis qui rendent la science possible.

La science a pour objectifs de *décrire*, *expliquer* et *prédire* les phénomènes naturels (Thouin, 2001, p. 8). Les sciences jeunes sont d'abord descriptives et s'attardent à la *description* et à la classification des organismes vivants, des substances, des planètes, des structures géologiques, etc. Les sciences plus avancées fournissent des *explications* des phénomènes observés. Par exemple, une éclipse solaire est expliquée par le passage de la Lune entre la Terre et le Soleil. Enfin, à leur stade ultime, les sciences effectuent la *prédiction* de certains phénomènes. Par exemple, la connaissance des lois du mouvement et la compréhension des orbites planétaires permettent de *prédire* le moment et la localisation des éclipses futures. La capacité de prédiction est un des éléments les plus spectaculaires de la science. La prédiction de l'existence et de la position de la planète Neptune par Le Verrier en 1846 en est un exemple célèbre (Thouin, 2001, p. 8). Les succès prédictifs de la science constituent une validation de la croyance selon laquelle la science est possible.

1.2 Caractéristiques des connaissances scientifiques

Caractéristiques de base : rationalité, vérifiabilité et faillibilisme

Les connaissances scientifiques possèdent plusieurs caractéristiques qui les distinguent des autres types de connaissances. Les connaissances scientifiques sont en principe *rationnelles*, *vérifiables* et *faillibles*. Elles sont *rationnelles* parce qu'obtenues à l'aide de raisonnements rigoureux inductifs ou déductifs. Elles sont *vérifiables* parce que les descriptions, explications et prédictions scientifiques sont confrontées au test de l'expérience. Enfin, elles sont *faillibles* parce qu'on ne les considère pas comme des

vérités éternelles, mais plutôt comme des connaissances temporaires et perfectibles qui pourront éventuellement être améliorées, voire remplacées en fonction des résultats de nouvelles expériences.

Conditions de la vérifiabilité: réfutabilité et reproductibilité

Afin d'être vérifiables, les connaissances scientifiques doivent être *réfutables*. Une loi scientifique est réfutable s'il existe, en principe, une expérience qui permettrait de montrer que cette loi est fausse. Par exemple, l'énoncé « le Soleil se lève tous les matins à l'Est » est réfutable. En effet, il suffirait que le Soleil se lève une fois à l'Ouest pour montrer que la loi est fausse. Il faut noter qu'un énoncé peut être réfutable et faux. Par exemple, l'énoncé « à la surface de la Terre, tous les corps tombent vers le bas » est réfutable et faux. En effet, il suffit d'observer un ballon d'hélium s'envoler vers le haut pour réfuter l'énoncé.

Certains énoncés sont irréfutables. L'énoncé « il existe quelque part une planète habitée par des licornes bleues » est irréfutable. L'énoncé est probablement faux, mais il n'existe pas d'expérience qui permettrait de s'en assurer. En effet, on pourrait toujours argumenter que la planète se trouve ailleurs que là où on l'a cherchée. Un autre exemple est l'énoncé « les Sagittaire ont de bonnes chances de gagner à la loterie aujourd'hui ». Cet énoncé est irréfutable parce que si une personne Sagittaire joue à la loterie ce jour-là, l'énoncé ne peut être montré faux, que la personne gagne ou non. Les énoncés des horoscopes sont souvent irréfutables. Certains énoncés irréfutables sont toujours vrais. Par exemple, l'énoncé « chaque jour, il pleut ou il ne pleut pas » est toujours vrai, qu'il pleuve ou non. Il n'est pas possible de réfuter un tel énoncé. Les énoncés irréfutables ne nous apprennent rien d'intéressant sur la réalité et ne sont pas scientifiques.

La vérifiabilité des connaissances scientifiques implique qu'en plus d'être réfutables, celles-ci doivent aussi réussir le test de l'expérience. La vérifiabilité implique que les observations et mesures effectuées sur la réalité soient *reproductibles*, c'est-à-dire que des expériences réalisées selon des conditions identiques doivent produire les mêmes résultats. Si un scientifique obtient certains résultats lors d'une expérience et qu'aucun autre scientifique n'arrive à obtenir les mêmes résultats, l'expérience n'est pas reproductible. Lorsqu'une expérience n'est pas reproductible, elle ne peut être utilisée pour produire de nouvelles connaissances scientifiques.

Faillibilisme : entre dogmatisme et relativisme extrême

Le faillibilisme est un principe qui consiste à considérer les connaissances scientifiques actuelles comme temporaires et perfectibles et non comme des vérités immuables

auxquelles on devrait croire aveuglément. La science est en principe faillibiliste. Malheureusement, plusieurs personnes croient à tort que la science a la prétention de découvrir des vérités définitives et indiscutables. Cette conception dogmatique de la science, largement répandue dans le grand public, souvent transmise par l'éducation au secondaire et encore véhiculée par une partie de la communauté scientifique elle-même, donne à la science des allures de foi religieuse à laquelle on adhère avec ferveur ou de laquelle on s'éloigne avec crainte ou mépris (Thouin, 2001, p. 12-13). Dans les deux cas, il y a une mauvaise évaluation des possibilités et des limites de la science. Ceux qui adoptent une attitude dogmatique font preuve de scientisme et surévaluent les possibilités offertes par la science. Au contraire, ceux qui font preuve d'un trop grand relativisme en viennent à confondre les faits avec les opinions, à considérer que tout se vaut et ainsi à accorder la même crédibilité à l'astrologie qu'à l'astronomie, à la numérologie qu'à l'arithmétique et à l'homéopathie qu'à la pharmacologie (*ibid.*, p. 13). Ces deux positions extrêmes sont regrettables parce que d'une part elles minimisent l'importance des activités humaines non scientifiques comme l'art et la philosophie et d'autre part elles favorisent la diffusion des pseudosciences et nuisent aux enjeux sociaux qui ont des composantes scientifiques comme les politiques de santé publique et la problématique des changements climatiques.

1.3 Vocabulaire scientifique: des observations aux théories

Les connaissances scientifiques sont interreliées et font partie d'une structure hiérarchique complexe qui fait intervenir un vocabulaire spécialisé. Il est important de bien définir ce vocabulaire, notamment parce que les mots utilisés par les scientifiques ont parfois un sens différent de celui du langage de tous les jours. Cette section définit successivement les énoncés d'observation, les concepts, les lois, les théories et les modèles.

Énoncés d'observation

« Les *énoncés d'observation* sont des énoncés formulés pour décrire des observations, des mesures ou diverses données tirées de la nature » (Thouin, 2001, p. 8). « L'aimant de la boussole est affecté par le passage d'un courant électrique à proximité » est un exemple d'énoncé d'observation. Les énoncés d'observation ne sont jamais complètement objectifs et se situent à l'intérieur d'un cadre explicatif qui fait intervenir des *concepts* (aimant et courant électrique dans l'exemple précédent).

Concepts

« Les *concepts* sont des représentations mentales générales et abstraites permettant d'organiser et de simplifier les perceptions et les connaissances. » (*ibid.*, p. 9). La cellule, l'atome et la force sont des exemples de concepts.

Lois

Les *lois* sont des énoncés qui établissent des relations entre les concepts. La première loi du mouvement de Newton sur le mouvement naturel des corps et la loi de l'octet sur le nombre d'électrons présents sur la couche de valence d'un atome sont des exemples de lois scientifiques.

Théories

Les *théories* sont des ensembles de lois qui expliquent un grand nombre de phénomènes, permettent de faire des prédictions et constituent souvent la base d'un domaine scientifique. Des exemples de théorie scientifique sont la théorie de la gravitation universelle et la théorie de l'évolution. Il est à noter que dans le langage courant, le mot « théorie » peut avoir le sens d'une hypothèse personnelle aux fondements incertains. Dans le langage scientifique, c'est tout le contraire et l'appellation « théorie » est réservée à des ensembles de connaissances aux fondements très solides et à large portée.

Modèles

Les modèles sont des structures formalisées servant à rendre compte d'un ensemble d'énoncés d'observation, de concepts, de lois et de théories reliés de diverses façons » (*ibid.*). Le modèle atomique et le modèle de l'ADN sont des exemples de modèles scientifiques.

1.4 Les méthodes scientifiques

La science désigne un ensemble cohérent de connaissances ainsi que la méthode qui permet de les acquérir (Thouin, 2001, p. 7-8). Mais quelle est cette fameuse *méthode scientifique*? En réalité, il n'existe pas une méthode unique que tous les scientifiques doivent suivre à la lettre, mais bien *des* méthodes scientifiques.

S'il existe plusieurs méthodes, elles font toutes appel à l'*expérimentation*. L'expérimentation est un processus planifié d'observations ayant pour but de confirmer ou d'infirmer des hypothèses, des lois ou des théories scientifiques. L'utilisation de l'expérimentation comme processus de validation des connaissances scientifiques

remonte au début du XVII^e siècle et marque le début de la science moderne. Les observations ou expériences sont souvent au cœur des méthodes scientifiques.

Selon Feyerabend (1979), la science est une œuvre de création qui ne se laisse pas emprisonner dans une série d'étapes. Malgré cela, on présentera tout de même, dans un but pédagogique, les étapes de la méthode OHÉRIC ainsi que les différences entre les approches inductives et déductives.

La méthode OHÉRIC

La méthode OHÉRIC est une manière de systématiser les étapes de la démarche scientifique. Cette méthode n'est pas unique et d'autres méthodes tout aussi valables auraient pu être présentées. La méthode OHÉRIC a pour avantages d'être simple à comprendre et d'avoir des étapes qui correspondent grosso modo à celles d'un rapport de laboratoire.

La méthode OHÉRIC fait intervenir les six étapes suivantes :

1. Observation
2. Hypothèse
3. Expérimentation
4. Résultats
5. Interprétation
6. Conclusion

Observation

Le point de départ de la méthode OHÉRIC est une observation qui suscite un questionnement. Il peut s'agir d'une observation personnelle ou survenue dans le cadre d'une expérience réalisée par quelqu'un d'autre. Le questionnement peut parfois surgir d'une lecture ou même d'une intuition.

Hypothèse

La seconde étape est la formulation d'une hypothèse susceptible de répondre au questionnement suscité par l'observation. L'hypothèse doit être vérifiable par une expérience, elle doit donc être un énoncé réfutable. L'hypothèse doit être plausible, pour cela elle doit tenir compte des connaissances scientifiques déjà acquises sur le sujet. Il est donc souhaitable d'effectuer une recherche documentaire avant de formuler une hypothèse. Il est à noter qu'il peut parfois y avoir plusieurs hypothèses.

Expérimentation

L'expérimentation consiste à effectuer une série d'observations susceptibles de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse. Le type d'expérimentation peut prendre plusieurs formes selon la discipline scientifique.

Résultats

Les résultats désignent l'ensemble des observations et mesures issues de l'expérimentation. Pour rendre celles-ci plus compréhensibles, elles doivent être organisées, souvent traitées mathématiquement et parfois soumises à des tests statistiques.

Interprétation

L'interprétation est l'étape qui consiste à donner du sens aux résultats. L'interprétation doit être orientée de façon à répondre au questionnement initial et éventuellement confirmer ou infirmer l'hypothèse.

Il est à noter que s'il est logiquement possible d'infirmer une hypothèse, il n'est jamais possible de la vérifier hors de tout doute. Ceci dit, une hypothèse qui résiste à plusieurs expérimentations réalisées dans des contextes variés peut être considérée comme confirmée, même si, faillibilisme oblige, un petit doute doit être conservé.

Conclusion

La conclusion est une synthèse de l'ensemble de la démarche et peut présenter de nouveaux questionnements, surtout si l'hypothèse n'est pas confirmée.

Approches inductives et déductives

Selon la discipline scientifique et le type de recherche, des méthodes différentes, mais toutes valables peuvent être utilisées. L'ensemble des méthodes possibles peut être séparé en deux approches distinctes : l'approche inductive et l'approche déductive. L'induction est un raisonnement logique qui consiste à tirer des conclusions générales à partir d'observations particulières. À l'inverse, la déduction est un raisonnement logique qui consiste à prédire des faits particuliers à partir d'une loi générale. Par exemple, l'observation répétée maintes et maintes fois que le Soleil se lève à l'Est permet d'*induire* la loi générale selon laquelle « le Soleil se lève toujours à l'Est ». La connaissance de la loi selon laquelle « le Soleil se lève toujours à l'Est » permet de *déduire* que le Soleil se lèvera à l'Est demain aussi. Les raisonnements inductifs partent du particulier vers le général et les raisonnements déductifs du général vers le particulier. La figure 1.4.1 schématise ces

deux types de raisonnement en les mettant en relation avec d'autres notions scientifiques.

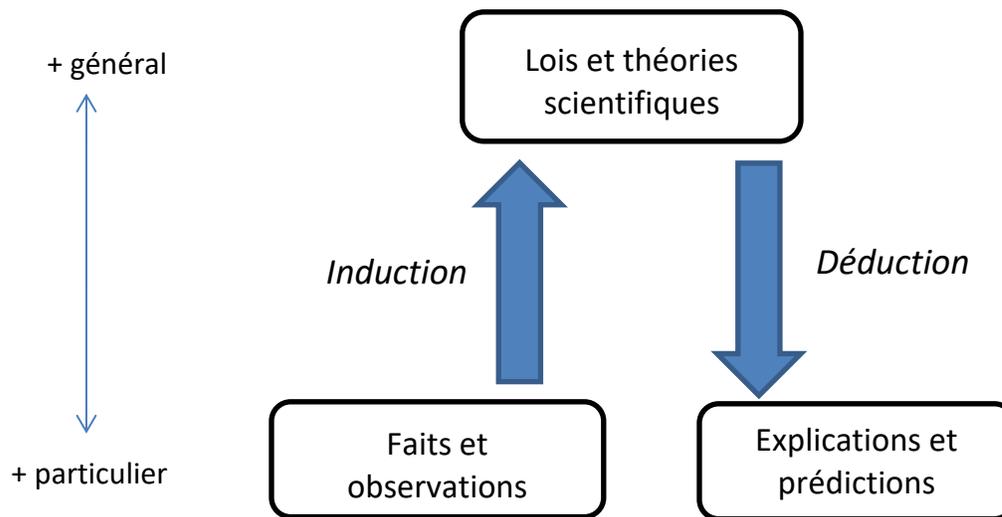


Figure 1.4.1: Raisonnements inductifs et déductifs

La démarche expérimentale classique utilise une approche inductive. Elle part d'observations particulières de la réalité et tente de construire des explications générales par des raisonnements inductifs. Les lois de Kepler sur le mouvement des planètes sont un exemple d'approche inductive. Pour élaborer ses trois lois, Kepler a analysé une grande quantité d'observations sur les positions des astres et a induit les lois générales connues aujourd'hui comme les lois de Kepler. La méthode OHERIC est une approche essentiellement inductive.

Certaines théories sont construites selon une approche déductive. Selon cette approche, la démarche débute avec la formulation d'hypothèses en apparence déconnectées d'observations. L'analyse des conséquences des hypothèses permet d'élaborer des lois générales. À partir de ces lois, on peut ensuite prédire par déduction l'existence de phénomènes. La théorie de la relativité d'Einstein est une théorie essentiellement déductive.

Dans la réalité, les démarches inductives et déductives s'entrecroisent, se nourrissent mutuellement et des allers-retours entre les deux types de raisonnements sont nécessaires pour construire des théories scientifiques. Par exemple, les théories déductives ne sont validées que lorsque leurs prédictions réussissent le test de l'expérience. De plus, l'origine des hypothèses de l'approche déductive ne peut être complètement déconnectée des observations de la réalité. À l'inverse, un certain bagage conceptuel précède toujours l'observation de la réalité. Les énoncés d'observation sont

construits en utilisant des concepts appartenant à un certain cadre théorique. Une observation pure de la réalité est impossible à réaliser, en d'autres mots, nous ne voyons que ce que nous sommes préparés à voir.

1.5 Les disciplines scientifiques

La science et les sciences

La science se dit parfois au singulier et parfois au pluriel. Au singulier, elle désigne l'activité humaine de recherche rationnelle de savoir et les connaissances ainsi acquises. Au pluriel, les sciences (on parle aussi de disciplines scientifiques) désignent les différentes branches de la science qui se distinguent les unes des autres par leur objet d'étude. On distingue généralement les sciences naturelles des sciences humaines. Les sciences naturelles (ou sciences de la nature) ont pour objet d'étude le fonctionnement de la nature alors que les sciences humaines (on dit parfois sciences humaines et sociales) ont pour objet d'étude l'être humain sur un plan individuel et sur un plan collectif.

Les sciences naturelles

Les sciences naturelles comportent trois disciplines principales: la physique, la chimie et la biologie ainsi que leurs nombreuses ramifications. « La physique a pour objet d'étude les propriétés générales de la matière, de l'espace et du temps » (Thouin, 2001, p. 23). Elle cherche à construire des lois qui rendent compte de tous les phénomènes du monde naturel, de l'infiniment petit à l'infiniment grand. « La chimie a pour objet l'étude de la structure et de la composition des substances, de leurs propriétés et de leurs transformations » (*ibid.*, p. 71). La biologie a pour objet d'étude la vie, son fonctionnement, l'interdépendance entre les êtres vivants et leurs relations avec le monde physique.

De nombreuses autres sciences existent et sont toutes liées à une ou à plusieurs des trois disciplines principales. Il serait impossible de nommer toutes les disciplines scientifiques, mais une courte liste inclurait certainement l'astronomie, la géologie, l'agronomie, l'océanographie, la climatologie, la biochimie et la pharmacologie.

Les mathématiques

« Les mathématiques étudient les propriétés des nombres, des figures géométriques, des fonctions et des espaces, ainsi que les relations qui existent entre eux » (Thouin, 2001, p. 297). Les mathématiques ne sont pas une science à proprement parler. Contrairement

à la science, les mathématiques n'ont pas pour objet de comprendre la réalité et elle n'a pas recours à l'observation ni à l'expérience, qui sont deux des éléments majeurs de la science. Ceci dit, les mathématiques sont un outil indispensable pour la science, elles constituent son principal langage et y sont omniprésentes. Plusieurs théories et lois scientifiques sont formulées par des relations mathématiques et de nombreuses découvertes n'auraient pas été possibles sans l'apport crucial des mathématiques. Enfin, les mathématiques ont une pertinence qui dépasse son aspect utilitaire pour les sciences et l'échafaudage des théories mathématiques construit dans les derniers siècles constitue un des grands accomplissements de l'intelligence humaine.

Liens entre les disciplines

Les différentes disciplines scientifiques se recoupent et leurs frontières sont poreuses. Par exemple, la physique et la chimie se rencontrent à l'échelle atomique et étudient les mêmes phénomènes, quoique selon des perspectives différentes. Certains phénomènes complexes comme les changements climatiques nécessitent la contribution de nombreuses disciplines scientifiques pour être expliqués convenablement. La porosité entre les disciplines allie parfois des objets d'étude qui relèvent à la fois des sciences naturelles et humaines. Les études récentes en neuropsychologie, qui démontrent de plus en plus de liens entre le fonctionnement du cerveau et le comportement humain, sont un bon exemple de porosité entre la biologie et la psychologie. D'autres disciplines, comme la géographie et l'anthropologie, se situent aussi à cheval entre les sciences humaines et naturelles. Enfin, il est à noter que la manière de distinguer les sciences les unes des autres varie beaucoup selon les époques, les pays, les institutions et les auteurs.

1.6 Science et technologie

On confond parfois la science avec la technologie. Pourtant, leurs objets d'étude sont très différents. Alors que la science a pour objectif de produire des connaissances, la technologie cherche à produire des objets, des outils ou des procédés pour répondre aux besoins des humains et des industries. La confusion entre science et technologie vient du fait que la technologie est de plus en plus complexe et s'appuie de manière croissante sur la science. Inversement, l'activité scientifique utilise beaucoup la technologie pour l'aider à mesurer, à détecter, à sonder le très petit, le très loin, etc. De nos jours, la production et la compréhension des technologies requièrent des bases scientifiques solides, comme celles que possèdent les ingénieurs par exemple. Ce lien très fort entre la science et la technologie est toutefois assez récent dans l'histoire et il ne prend de l'importance qu'au

milieu du XIXe siècle dans des secteurs comme l'industrie chimique et celle de l'équipement électrique (Gingras et coll., 1998, p. 13).

L'utilisation des technologies modernes a plusieurs impacts sur l'environnement, l'économie, le mode de vie et la santé des populations. Plusieurs de ces impacts sont positifs et contribuent indiscutablement à améliorer le bien-être de la population. Le contrôle des épidémies par la vaccination et l'utilisation d'antibiotiques pour guérir les infections sont des technologies qui ont transformé la société en réduisant significativement la mortalité infantile. Au Canada, de 1920 à 2011, l'augmentation de l'espérance de vie est principalement attribuable à la prévention des décès chez les plus jeunes, notamment grâce à la vaccination (Statistiques Canada, 2018). Par contre, l'utilisation massive de certaines technologies peut nuire à la santé en réduisant la qualité de l'air, de l'eau et de la nourriture consommée par la population (Portail Santé Mieux-être Québec, 2017). Elle peut aussi menacer la biodiversité en contribuant à la destruction de l'habitat de plusieurs organismes vivants (WWF, s.d.). De plus, la technologie n'existe pas toujours pour répondre à des besoins, elle les précède parfois et son moteur peut être la recherche du profit plutôt que celle du bien-être de la population. L'étude de la valeur de la technologie ne relève pas de la science, mais de l'éthique. Toutefois, il est souhaitable de posséder un bagage scientifique de base pour mieux appréhender la technologie dans ce qu'elle peut avoir de meilleur et de pire.

2. Le programme de sciences de la nature

2.1 Finalité et buts du programme

Le programme de sciences de la nature est un programme préuniversitaire offert dans la majorité des établissements collégiaux du Québec. Selon le ministère de l'Enseignement supérieur du Québec (2021, page 5), « le programme d'études *Sciences de la nature* offre à l'élève une formation diversifiée et rigoureuse comportant une formation générale et une formation spécifique appuyée sur des disciplines scientifiques. Il le rend apte à poursuivre des études universitaires en sciences pures, en sciences appliquées, en sciences de la santé et de la vie ou en sciences de l'éducation. ».

Toujours selon le ministère de l'Enseignement supérieur (2021, page 5), à la fin de ses études, « l'élève saura :

- exploiter les savoirs disciplinaires permettant la consolidation et l'enrichissement d'une culture scientifique de base;
- traiter de situations complexes dans une perspective d'interdisciplinarité;
- apprécier les liens unissant les sciences, les technologies et la société;
- faire preuve de sens critique et de rigueur intellectuelle;
- utiliser les technologies numériques dans un contexte scientifique;
- développer un esprit de collaboration et communiquer. »

2.2 Structure du programme

La réussite du programme de sciences de la nature est associée à l'atteinte d'un certain nombre de compétences obligatoires et facultatives. Ces compétences sont regroupées en trois catégories selon le type de formation :

Tableau 2.2.1 : Nombre de périodes d'enseignement selon le type de formation

Type de formation	Nombre de périodes d'enseignement
Formation spécifique	900
Formation générale	570
Formation complémentaire	90
Total	1560

Pour ce qui est de la formation spécifique, le nombre de périodes allouées à chacune des disciplines est réparti de la manière suivante :

Tableau 2.2.2 : Nombre de périodes d'enseignement selon la discipline

Disciplines de la formation spécifique	Nombre de périodes d'enseignement
Mathématiques	240
Physique	210
Chimie	135
Biologie	105
Informatique	45
Intégration	45
Facultatif	120
Total	900

C'est le ministère de l'Enseignement supérieur du Québec (2021, page 15) qui détermine les compétences à atteindre dans le cadre du programme de sciences de la nature. Voici ces compétences :

Tableau 2.2.3 : Compétences communes du programme de sciences de la nature

OB01	Expliquer les structures et les fonctions des cellules en tant qu'unités de base de la vie.
OB02	Analyser les interactions des êtres vivants dans la biosphère.
OM01	Résoudre des problèmes liés aux sciences de la nature par l'utilisation de méthodes statistiques et de concepts de probabilités.
OM02	Analyser des problèmes par l'application du calcul différentiel.
OM03	Analyser des problèmes par l'application du calcul intégral.
OM04	Analyser des problèmes par l'utilisation de concepts de l'algèbre linéaire et de la géométrie vectorielle.
OC01	Analyser des propriétés de la matière et des transformations chimiques.
OC02	Analyser des systèmes chimiques en solution.
OP01	Analyser des situations et des phénomènes physiques en recourant aux lois et aux principes fondamentaux de la mécanique classique.
OP02	Analyser des situations et des phénomènes physiques en recourant aux lois et aux principes fondamentaux liés à l'électricité et au magnétisme.
OP03	Analyser des situations et des phénomènes physiques en recourant aux lois et aux principes fondamentaux liés aux ondes et à la physique moderne.
OF01	Développer des programmes informatiques en vue d'automatiser la résolution de problèmes dans un contexte scientifique.
ONTC	Démontrer l'intégration de ses acquis en Sciences de la nature.

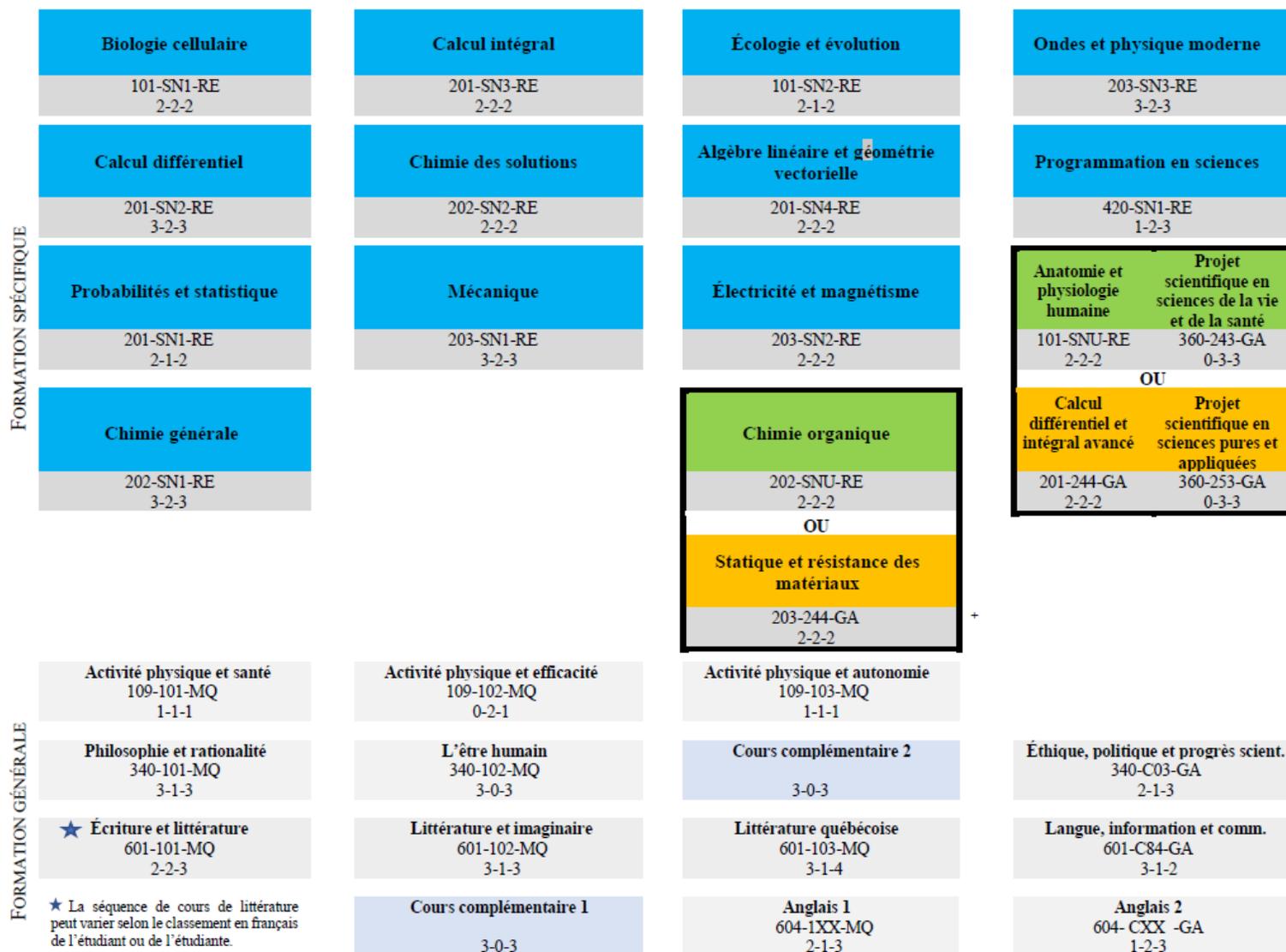
Tableau 2.2.4 : Compétences facultatives du programme de sciences de la nature

OGNF	Consolider sa culture scientifique dans un domaine des sciences de la nature.
OBOF	Expliquer comment les systèmes du corps humain assurent l'homéostasie.
OCOF	Analyser la structure et la réactivité des molécules organiques.

Afin de développer et éventuellement d'atteindre ces compétences, les étudiants et étudiantes suivent un ensemble de cours, chacun d'eux étant associé à une compétence (sauf les compétences ONTC et OGNF qui sont associées à deux cours). Chaque discipline est associée à un ou à plusieurs cours, obligatoires pour la plupart et facultatifs pour certains. La séquence complète des cours à suivre est présentée à la page suivante sous forme de logigramme.

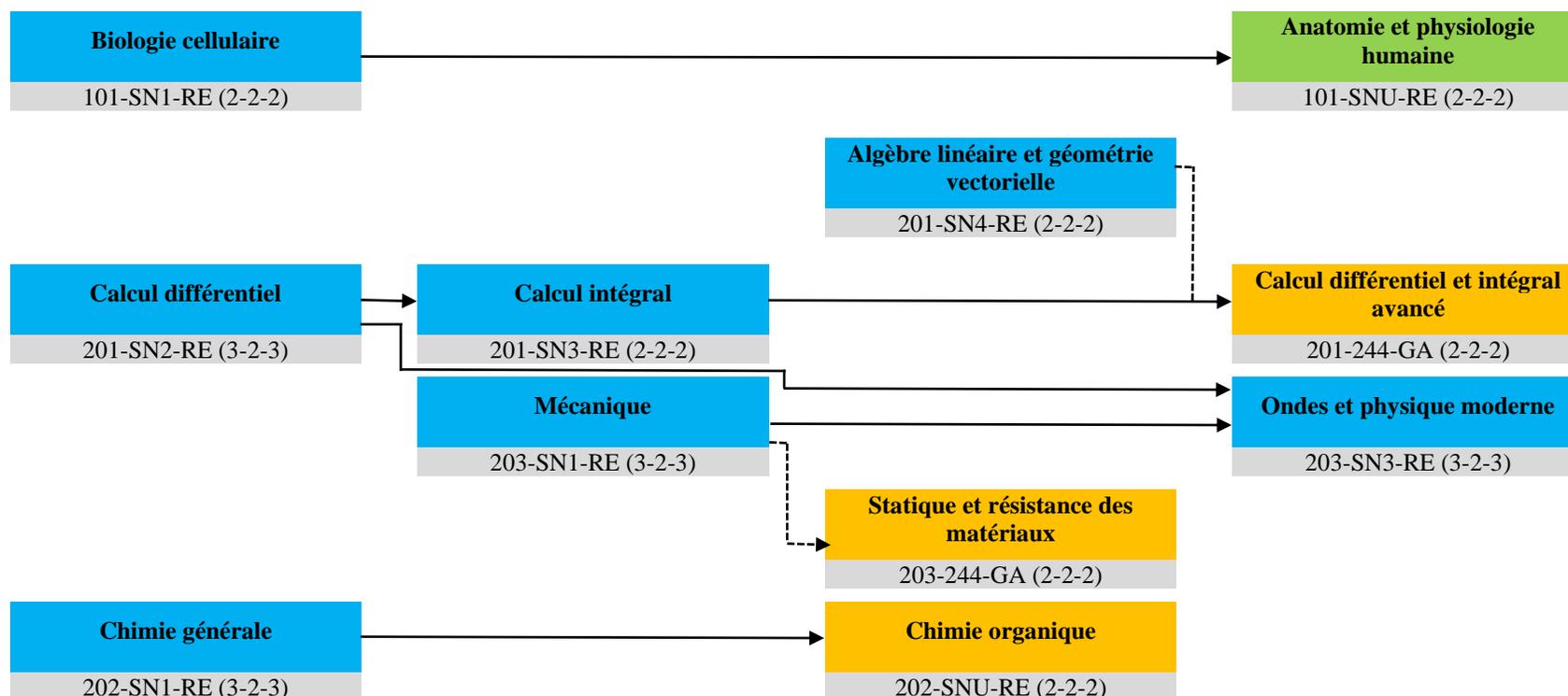
Il est de la responsabilité des étudiants et étudiantes de s'assurer que leur choix de cours, effectué à chacune des sessions d'études, leur permettra de respecter le cheminement et de compléter la formation dans les délais prévus. À noter qu'il est possible d'étaler le cheminement sur une période supérieure à deux années. Les étudiants et étudiantes peuvent compter sur leur aide pédagogique individuelle pour les assister dans la planification de leur choix de cours et de leur cheminement global.

2.3 Logigramme de cours



2.4 Préalables

Certains cours sont préalables à d'autres. Voici les séquences de cours concernées par des préalables (représentés par des flèches). Il y a aussi des préalables pour les cours de la formation générale. Ces préalables ne sont pas représentés ici.



Légende

→	Préabilité absolu
- - - - ->	Préabilité relatif

2.5 Choix de cours et profils

À partir de la troisième session, les étudiants et étudiantes peuvent personnaliser leur cheminement et choisir le profil qui correspond le mieux à leurs aspirations académiques et professionnelles. Les deux profils sont « sciences pures et appliquées » et « sciences de la vie et de la santé ». Voici les cours associés à chacun de ces profils.

Tableau 2.5.1 : Cours suivis selon la session du cheminement et le profil choisi

Session	Sciences pures et appliquées	Sciences de la vie et de la santé
3	Statique et résistance des matériaux	Chimie organique
4	Calcul différentiel et intégral avancé	Anatomie et physiologie du vivant
	Projet scientifique en sciences pures et appliquées	Projet scientifique en sciences de la vie et de la santé

Le choix effectué à la troisième session ne détermine pas celui de la quatrième session : autrement dit, il est possible de changer de profil en cours de route. Il n'est toutefois pas possible de mélanger des cours de deux profils différents pendant une même session. Il est à noter que **les cours du profil des sciences de la vie et de la santé sont obligatoires pour pouvoir s'inscrire dans certains programmes universitaires en santé**. L'inverse n'est pas vrai, mais les cours du profil sciences pures et appliquées offrent une meilleure préparation pour ceux et celles qui savent qu'ils ou elles se dirigeront vers ces domaines universitaires.

Enfin, même si certains cours suivis diffèrent, les deux profils mènent exactement au même diplôme, c'est-à-dire un diplôme d'études collégiales (D.E.C.) en sciences de la nature.

2.6 Épreuve synthèse de programme et activités d'intégration

L'obtention du diplôme d'études collégiales est conditionnelle à la réussite de l'épreuve synthèse de programme (ÉSP). Celle-ci « doit attester de l'intégration des apprentissages réalisés dans l'ensemble du programme, donc la capacité de l'[étudiant] à utiliser, de façon intégrée et autonome, les compétences acquises dans l'ensemble de ses cours » (Cégep de la Gaspésie et des Îles, Direction des études, 2009, pages 19). Les règles qui encadrent la réalisation de l'ÉSP (notamment les conditions d'admissibilité et de reprise) sont détaillées dans la PIEA (Cégep de la Gaspésie et des Îles, 2009, pages 19-20).

Au Campus des Îles, la réussite de l'ÉSP est associée à la réussite d'un des deux cours porteur : « projet scientifique en sciences pures et appliquées » et « projet scientifique en sciences de la vie et de la santé ». La compétence de ces deux cours est de « démontrer l'intégration de ses acquis en sciences de la nature » (Ministère de l'Enseignement supérieur du Québec (2021, page 15).

L'atteinte de la compétence du cours porteur de l'épreuve synthèse constitue une réalisation importante dans le cheminement académique des étudiants et étudiantes. Elle montre qu'ils et elles ont acquis une autonomie leur permettant de réinvestir leurs compétences pour affronter des situations nouvelles. Même si cette compétence n'est évaluée formellement qu'à la dernière session du programme d'études, « *tous souhaitent que l'intégration des apprentissages et des attitudes soit visée de façon continue et explicite dans l'ensemble des cours du programme, et non exclusivement dans un cours placé à la fin du programme* » (MEES, 2016, page 10).

Dans le programme de sciences de la nature du Campus des Îles-de-la-Madeleine, le souhait ministériel que l'intégration des apprentissages soit visée de manière continue est réalisé par la tenue d'activités d'intégration prévues à chacune des sessions du programme. Ces activités sont portées par des cours spécifiques prédéterminés et sont habituellement encadrées par des enseignants et enseignantes de disciplines variées. Les activités prennent la forme de travaux longs couvrant une partie significative de la session. Ainsi, l'épreuve synthèse de programme n'est pas un ajout artificiel à la fin du cheminement mais plutôt la conclusion d'une série d'activités pédagogiques intégratrices réalisées tout au long du cheminement. Voici les activités d'intégration prévues à chacune des sessions ainsi que leurs cours porteurs.

Tableau 2.6.1 : Activités d'intégration prévus et leurs cours porteurs

Session	Activité d'intégration	Cour(s) porteur(s)
1	Projet d'initiation à la recherche scientifique	Biologie cellulaire Chimie générale Probabilités et statistique
2	Analyse mathématique d'un objectif de développement durable	Calcul intégral
3	Analyse d'un mode de production d'énergie électrique	Écologie et évolution Électricité et magnétisme
4	Épreuve synthèse de programme	Projet scientifique en sciences pures et appliquées ou Projet scientifique en sciences de la vie et de la santé

2.7 Intentions éducatives

Selon le Cégep de la Gaspésie et des Îles, Campus des Îles-de-la-Madeleine (2022, p. 11), « les intentions éducatives décrivent le cadre général qui guide les choix pédagogiques de l'équipe d'enseignement et oriente l'expérience éducative des étudiants et étudiantes. Les intentions éducatives ne sont pas des buts supplémentaires mais plutôt des stratégies pour atteindre les objectifs généraux de programme. Ces stratégies reflètent les valeurs, l'identité et la vision du programme de sciences de la nature au campus des Îles-de-la-Madeleine. Les valeurs du programme de sciences de la nature sont l'engagement, l'ouverture, la créativité, l'entraide et l'attachement au milieu maritime et aux principes du développement durable.

Les intentions éducatives s'articulent autour d'une vision comportant trois axes :

1. Interdisciplinarité
2. Développement durable
3. Initiation à la recherche scientifique

Ces axes sont visibles de manière formelle dans l'orientation générale des plans cadres du programme et de manière informelle dans les attitudes et comportements des acteurs et actrices du programme de sciences de la nature. Voici comment chacun des trois axes de notre vision se concrétise dans la réalité.

Interdisciplinarité

- La grille de cours est élaborée de manière à favoriser les activités pédagogiques relevant de plusieurs cours à la fois.
- Des activités pédagogiques interdisciplinaires, appelées activités d'intégration, ont lieu à chacune des sessions du cheminement régulier.
- L'équipe d'enseignement cherche continuellement à développer de nouveaux liens formels et informels entre tous les cours du programme, incluant la formation générale et spécifique.
- Les relations interpersonnelles entre l'équipe d'enseignement et les étudiants et étudiantes se fait dans une atmosphère d'entraide.

Développement durable

- Les thématiques des activités pédagogiques et des évaluations sont choisies de manière à initier les étudiants et étudiantes aux objectifs de développement durable de l'ONU.

- Les activités pédagogiques sont choisies de manière à faire participer les étudiants et étudiantes à des projets en lien avec le développement durable et le milieu maritime.

Initiation à la recherche scientifique

- Des activités pédagogiques sont conçues pour initier les étudiants et étudiantes à la recherche scientifique.
- Des activités pédagogiques sont conçues pour que les étudiants et étudiantes participent à d'authentiques projets de recherche, habituellement en collaboration avec les Centres collégiaux de transfert de technologie du Cégep de la Gaspésie et des Îles et d'autres acteurs du milieu. »

3. Mesures et incertitudes

3.1 Types d'observations

Toute connaissance scientifique provient ultimement d'observations effectuées sur le réel. Les modèles planétaires ont été élaborés à partir d'*observations* sur la position des astres dans le ciel; la loi de Boyle découle d'observations sur le comportement des gaz et la théorie de l'évolution des espèces s'appuie entre autres sur l'observation de similitudes dans l'anatomie d'espèces animales voisines.

Les observations peuvent être quantitatives, semi-quantitatives ou simplement qualitatives. Une observation est *quantitative* lorsqu'elle implique la prise d'une *mesure*. La mesure, ou le mesurage, est un « processus consistant à obtenir expérimentalement une ou plusieurs valeurs [numériques] que l'on peut raisonnablement attribuer à une grandeur » (Bureau international des poids et mesures, 2008, page 16). Une observation est de nature « *qualitative* lorsqu'elle décrit des variables comme la forme, la disposition, la séquence, la couleur, etc. » (Gilles Boisclair et Jocelyne Pagé, 1998, page 5). Une observation est *semi-quantitative* lorsqu'elle porte sur l'ordre de grandeur d'une variable. Cet ordre de grandeur peut être estimé, ou déterminé à partir de données qualitatives telles que la couleur (Gilles Boisclair et Jocelyne Pagé, 1998, page 8). Voici quelques exemples des différents types d'observations.

Observations *quantitatives*:

- La longueur de cette tige métallique est de 123 cm.
- Le volume de cette solution est de 456 ml.
- Le nombre d'ammophiles à l'intérieur de ce quadrat de 1,0 m² est de 78.

Observations *qualitatives*:

- La couleur de cet échantillon montre qu'il a un taux de nitrate « élevé » selon l'échelle standard.
- Placée au soleil, cette solution s'évapore tranquillement.
- Les feuilles de cet arbre deviennent rouges à l'automne.

Observations *semi-quantitatives*:

- À l'intérieur de ce quadrat de 1,0 m², le pourcentage de recouvrement d'ammophile est de 30%.
- Aujourd'hui, le vent a une force de 5 selon l'échelle de Beaufort (sur une échelle de 0 à 12).

- Ce patient comateux a un résultat de 3 sur l'échelle de Glasgow (échelle de 3 à 15).

3.2 Précision des mesures et chiffres significatifs

La plupart des lois et des théories scientifiques s'expriment à partir de relations mathématiques entre des variables qui représentent des grandeurs physiques. Il n'est donc pas étonnant que la plupart des observations scientifiques soient de nature quantitative. Parce qu'elles font intervenir des valeurs numériques, les observations quantitatives, ou *mesures*, semblent plus précises que les observations qualitatives. C'est très souvent le cas, mais il ne faut pas commettre l'erreur de croire que la mesure reflète *exactement* la réalité. Une mesure est une *tentative* faite par un expérimentateur pour attribuer une valeur numérique (et la plupart du temps une unité de mesure) à une grandeur physique réelle. Il n'est pas raisonnable de supposer que le résultat d'une mesure corresponde exactement à la réalité. En effet, compte tenu de la précision limitée des instruments de mesure utilisés, de l'imperfection des organes sensoriels des humains et des conditions peut-être difficiles dans lesquelles la mesure a été effectuée, celle-ci sera plus ou moins éloignée de la valeur réelle. Le résultat d'une mesure ne constitue donc qu'une *estimation* de la valeur réelle de la grandeur mesurée. Les mesures effectuées s'accompagnent donc toujours d'une certaine *incertitude*. Une des tâches des scientifiques consiste donc à quantifier l'incertitude qui accompagne nécessairement toute mesure et à tenir compte de celle-ci dans toutes les étapes subséquentes de l'analyse des données, des simples calculs jusqu'aux conclusions finales.

Les chiffres significatifs

Si une quantité numérique est issue directement ou indirectement d'une mesure, la manière d'écrire cette quantité doit refléter sa précision. Pour ce faire, on limite le nombre de chiffres des quantités en évitant d'inclure des chiffres qui ne sont pas *significatifs*.

Mise en situation

On souhaite déterminer la surface totale de la Terre à partir de son rayon. On sait que le rayon terrestre (r) est de 6 371 km et que la surface (S) d'une sphère est donnée par la formule

$$S = 4\pi r^2.$$

Le calcul de la surface donne donc :

$$S = 4\pi r^2 = 4\pi(6371 \text{ km})^2 = 510\,064\,471,909788 \text{ km}^2$$

Ce dernier nombre ne reflète pas correctement la valeur de la surface terrestre parce qu'il donne l'illusion que celle-ci est connue avec une précision de l'ordre du millionième de kilomètre carré. Il s'agit d'une précision ridiculement optimiste compte tenu de la précision limitée de la valeur du rayon qui a servi à faire le calcul. Ce rayon (6371 km) est exprimé à l'aide de quatre chiffres, on dit donc qu'il possède quatre *chiffres significatifs*. Lorsqu'on multiplie une mesure ayant un certain nombre de chiffres significatifs, le résultat de la multiplication ne peut pas posséder plus de chiffres significatifs que ceux de la mesure. Dans notre mise en situation, il faudrait donc arrondir le résultat en ne conservant que les quatre premiers chiffres et en arrondissant le dernier des quatre. Selon notre calcul, la surface terrestre serait donc de

$$S = 4\pi r^2 = 4\pi(6371 \text{ km})^2 = 510\,064\,471,909788 \text{ km}^2 \cong 510\,100\,000 \text{ km}^2$$

ou plus simplement 510,1 millions de kilomètres carrés. Tous les autres chiffres du résultat initial *ne sont pas significatifs* et les écrire induirait en erreur quant à la précision de cette quantité.

Règles de calcul en tenant compte des chiffres significatifs

La manière de tenir compte des chiffres significatifs dans les calculs dépend du type d'opération effectuée. Voici les règles à suivre pour les opérations mathématiques de base:

1. Le produit ou le quotient de mesures comporte autant de chiffres significatifs que la mesure qui en a le moins.
2. La somme ou la différence de mesures a la même précision que la mesure la moins précise.

Exemples:

$$1,23 \text{ m} \times 4,567 \text{ m} = 5,62 \text{ m}^2$$

$$8,9012 \text{ g} \div 3,4 \text{ mol} = 2,6 \text{ g/mol}$$

$$(0,5678 \text{ m})^3 = 0,1831 \text{ m}^3$$

$$3,21 \text{ m} + 5,4 \text{ m} = 8,6 \text{ m}$$

$$8,9012 \text{ g} - 0,333 \text{ g} = 8,568 \text{ g}$$

Le chiffre « zéro » : parfois significatif, parfois pas

Le chiffre zéro ne compte pas toujours pour un chiffre significatif. En effet, la quantité 0,025 m ne comporte pas quatre chiffres significatifs, mais seulement deux. En effet, les deux zéros au début du nombre ne sont pas liés à la précision de la quantité, mais à son

ordre de grandeur. D'ailleurs, cette quantité pourrait être exprimée en millimètres, elle serait alors de 25 mm, une quantité qui possède effectivement deux chiffres significatifs et non quatre. Il est important de savoir déterminer si les zéros d'un nombre sont significatifs ou non. Pour ce faire, on peut se fier aux règles suivantes :

1. Les zéros au début d'un nombre ne sont jamais significatifs.
2. Les zéros au centre d'un nombre sont toujours significatifs.
3. Les zéros à la fin d'un nombre qui comporte au moins une décimale sont significatifs.
4. Les zéros à la fin d'un nombre qui ne comporte pas de décimales peuvent être significatifs ou non selon le contexte.

Le tableau suivant présente plusieurs cas couvrant la majorité des situations possibles.

Tableau 3.2.1 : Analyse du caractère significatif des zéros dans un nombre

Quantité	Nombre de chiffres significatifs	Explication
0,0012	2	Règle 1
0,001002	4	Règles 1 et 2
0,00120	3	Règles 1 et 3
1,20	3	Règle 3
1,200	4	Règle 3
120,0	4	Règle 3
1200	2 ou 3 ou 4	Règle 4

Dans certaines situations, c'est le contexte qui indique si les zéros à la fin d'un nombre sont significatifs ou non. Par exemple, si on compte les personnes présentes dans une pièce et qu'il y en a exactement 100, les zéros de cette quantité sont significatifs. Si toutefois un article de journal indique qu'environ 400 personnes ont assisté à un spectacle, les zéros de cette quantité ne sont pas significatifs parce qu'il s'agit manifestement d'une estimation, on n'est pas certain qu'il y ait eu exactement 400 spectateurs. Par ailleurs, il se pourrait qu'on ait dénombré les spectateurs avec une précision de 10 personnes, auquel cas un des zéros du nombre serait significatif et l'autre pas.

Parce qu'elle implique quasi systématiquement l'utilisation de décimales, la notation scientifique est la seule qui permet d'éviter toute ambiguïté quant au caractère significatif des zéros qui composent un nombre. Par exemple, à l'aide de la notation scientifique, la

quantité 100 000 peut être exprimée avec le nombre de chiffres significatifs désiré sans risque de confusion :

Tableau 3.2.2 : Utilisation de la notation scientifique pour exprimer sans ambiguïté la précision d'une quantité

Quantité	Nombre de chiffres significatifs
$1,00000 \times 10^5$	6
$1,0000 \times 10^5$	5
$1,000 \times 10^5$	4
$1,00 \times 10^5$	3
$1,0 \times 10^5$	2
1×10^5	1

Il est important de bien comprendre que les quantités de la première colonne du tableau précédent ne sont pas équivalentes. Elles ont la même valeur numérique, *mais pas la même précision*. Ainsi, il est important d'écrire les quantités issues de mesures en utilisant un nombre de chiffres significatifs qui reflète fidèlement leur précision.

Par exemple, si une balance numérique affiche une masse de 2,300 g, il est important de noter les deux zéros parce qu'ils sont significatifs. Noter simplement 2,3 g (sous prétexte que c'est la même valeur que 2,300 g) laisserait croire à tort que la masse n'est connue qu'avec une précision d'un dixième de gramme alors qu'elle est cent fois plus précise.

3.3 Incertitudes absolue et relative

Comme expliqué longuement au début de la section précédente, les mesures effectuées lors d'expériences sont toujours imparfaites. Elles ont une précision limitée et une des tâches des scientifiques est de correctement évaluer l'ampleur de l'erreur, ou *incertitude*, qui accompagne nécessairement toute mesure. On peut définir deux types d'incertitudes : absolue et relative.

Incertitude absolue

L'incertitude absolue qui accompagne une mesure est le plus grand écart possible entre cette mesure et la grandeur réelle qu'on tente de mesurer (voir figure 1). Pour une

grandeur notée x , on note généralement son incertitude absolue par Δx . (Le symbole « Δ » est la lettre grecque « delta »).

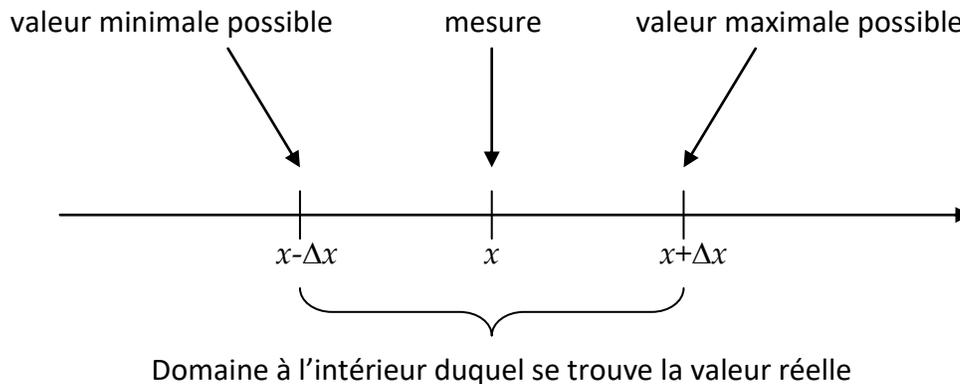


Figure 3.3.1: Représentation schématique de l'incertitude absolue

Incertitude relative

L'incertitude absolue n'est pas le meilleur outil pour évaluer la précision d'une mesure. En effet, pour qu'une mesure soit précise, il faut que l'incertitude absolue soit petite *par rapport à la valeur de la mesure*. Considérons par exemple le tableau suivant où sont présentées les mesures et incertitudes de trois longueurs différentes.

Tableau 3.3.1 : Mesures de longueur et leurs incertitudes

Longueur	d (km)	Δd (kg)	$\Delta d/d$ %
Distance Terre-Lune	384 000	1	0,00026%
Distance entre le quai de Grande-Entrée et le Cégep	62	1	1,6%
Diamètre de l'Île d'Entrée	3	1	33%

Bien que toutes ces longueurs soient connues avec une incertitude absolue de 1 km, la distance Terre-Lune est connue avec beaucoup plus de précision que les autres. Pourquoi? Parce que le rapport de l'incertitude sur la mesure ($\Delta d/d$) est beaucoup plus petit pour cette distance que pour les autres. En général, on appelle le ratio $\Delta x/x$ *l'incertitude relative*. L'incertitude relative est un meilleur indicateur de la précision d'une mesure que l'incertitude absolue. Par ailleurs, l'utilisation de l'incertitude relative est nécessaire pour effectuer des calculs d'incertitudes.

3.4 Présentation d'une mesure et de son incertitude

Incertitude absolue

Il existe plusieurs façons de représenter une mesure et son incertitude absolue. Certaines sont correctes, d'autres non. Voici quelques exemples de notations acceptables:

1. $300 \text{ kg} \pm 5 \text{ kg}$
2. **$(300 \pm 5) \text{ kg}$**
3. $3,00 \times 10^2 \text{ kg} \pm 0,05 \times 10^2 \text{ kg}$
4. $(3,00 \times 10^2 \pm 0,05 \times 10^2) \text{ kg}$
5. **$(3,00 \pm 0,05) \times 10^2 \text{ kg}$**

Bien que tous ces exemples soient corrects, il convient de favoriser les notations les plus légères (2 et 5). Il faut éviter de présenter une mesure et son incertitude avec des unités différentes ou dans des notations différentes. Les exemples suivants sont à rejeter:

6. $300 \text{ kg} \pm 5\,000 \text{ g}$
7. $3 \times 10^2 \text{ kg} \pm 5 \text{ kg}$
8. $300 \pm 5 \text{ kg}$

Incertitude relative

Pour présenter une mesure avec son incertitude, on peut choisir une des deux formes suivantes :

1. 300 kg à 2%
2. $300 \text{ kg} \pm 2\%$

Quelques règles générales

On exprime généralement l'incertitude absolue à l'aide d'un seul chiffre significatif. Pour éviter de sous-estimer une incertitude ou par souci d'uniformiser la présentation, il peut être préférable de conserver deux voire trois chiffres significatifs à l'incertitude absolue. L'évaluation du nombre de chiffres significatifs que doit comprendre un nombre relève parfois du simple bon sens.

Une fois que l'incertitude absolue a été déterminée et arrondie, **il est impératif d'arrondir la mesure associée de telle sorte qu'elle ait la même précision que son incertitude absolue.**

Par exemple, on n'écrit pas $6,32 \pm 0,1$ mais $6,3 \pm 0,1$.

L'incertitude relative est généralement exprimée à l'aide de deux chiffres significatifs. Encore une fois, il ne s'agit pas d'une règle absolue et d'autres considérations peuvent amener à choisir plus ou moins de chiffres significatifs pour l'incertitude relative.

Dans tous les cas, **on ne devrait arrondir que les résultats finaux et conserver autant de précision que nécessaire dans les calculs intermédiaires.**

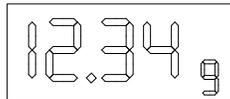
3.5 Précision des instruments de mesure

L'incertitude absolue qui accompagne une mesure dépend de la précision de l'appareil de mesure utilisé. Souvent, cette précision est indiquée par le fabricant, mais ce n'est pas toujours le cas. Lorsque la précision n'est pas indiquée, sa détermination dépend du type d'appareil de mesure utilisé. Cette section présente la manière d'évaluer l'incertitude absolue pour différents types d'appareils.

Appareils à affichage numérique

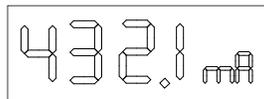
Plusieurs instruments de mesure modernes sont munis d'un affichage numérique (chronomètres, multimètres, balances, etc.). Souvent, les fabricants de ce type d'appareil fournissent de l'information sur leur précision. Dans le cas contraire, on utilise comme incertitude absolue la valeur de la plus petite décimale affichée. Voici quelques exemples:

1. balance (mesure de la masse):



$$m = 12,34 \text{ g}$$
$$\Delta m = 0,01 \text{ g}$$

2. multimètre (mesure de l'intensité du courant):



$$I = 432,1 \text{ mA}$$
$$\Delta I = 0,1 \text{ mA}$$

Échelle graduée (à l'exception des mesures de longueur)

Plusieurs instruments de mesure courants ont des échelles graduées (thermomètre, cylindre gradué, etc.). Pour les échelles graduées, il est très souvent possible de faire des

lectures entre deux graduations. Pour cette raison, l'incertitude absolue des échelles graduées correspond à *la moitié* de la plus petite division de l'échelle. La figure 3.5.1 présente un thermomètre et les lectures correctes de température et de l'incertitude absolue.

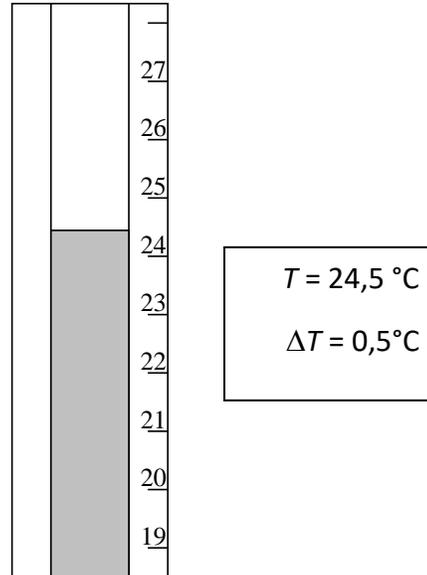


Figure 3.5.1: Incertitude absolue pour une échelle graduée (thermomètre dans ce cas)

Remarques

- Si les gradations sont suffisamment espacées, on peut se permettre de faire des lectures plus précises. Par exemple: 24,4 °C pour la température (voir figure ci-dessus). L'incertitude demeure toutefois à 0,5 °C.
- Si les gradations sont très rapprochées, il peut être difficile d'évaluer la mesure avec précision. Dans ce cas, on utilise une incertitude absolue égale à la plus petite division dans l'échelle.

Échelle graduée (mesures de longueur)

La mesure de la longueur d'un objet requiert deux lectures. Par exemple, pour mesurer un objet avec un ruban à mesurer, il faut d'abord aligner l'extrémité du ruban avec une extrémité de l'objet et faire la lecture de la mesure à l'autre extrémité. Puisqu'il y a un alignement à chaque extrémité, le risque d'erreur est multiplié par deux! Ainsi, l'incertitude absolue sur une telle mesure est égale à deux fois la moitié de la plus petite

division de l'échelle, soit la plus petite division de l'échelle. La figure 3.5.2 présente un crayon et les lectures correctes de sa longueur et de l'incertitude associée.

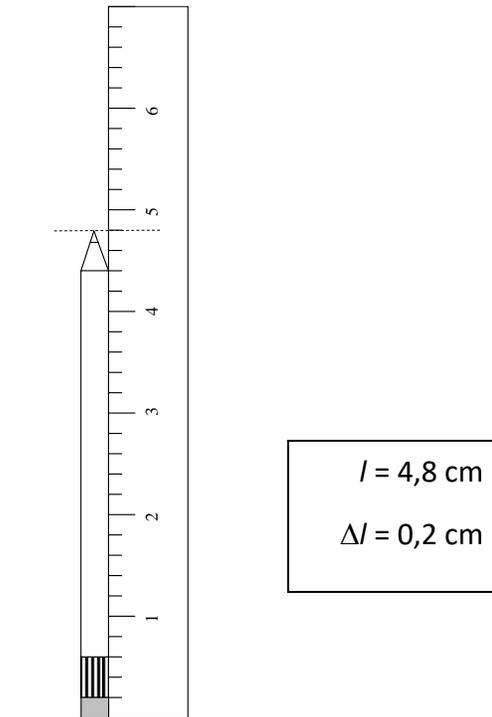


Figure 3.5.2: Incertitude absolue pour l'utilisation d'une règle

Afin de mesurer la longueur d'objets plus longs que l'outil de mesure, il peut être nécessaire d'utiliser celui-ci à plusieurs reprises et d'additionner les mesures obtenues. L'incertitude absolue de la mesure totale est alors multipliée par le nombre de mesures effectuées. Par exemple, si on utilise un mètre précis au cm près pour mesurer un objet de 3,86 m, quatre mesures successives seront nécessaires. Le résultat final de la mesure sera donc $(3,86 \pm 0,04) \text{ m}$.

Pied à coulisse et micromètre

Le pied à coulisse est un instrument qui permet de mesurer des longueurs avec une grande précision. Ce type d'instrument est muni d'un dispositif mobile, appelé vernier, permettant de mesurer avec précision *une fraction* de la plus petite division de l'échelle de mesure. L'incertitude absolue des mesures effectuées avec un pied à coulisse est égale à la plus petite variation de grandeur que l'instrument est capable de mesurer (Gilles Boisclair et Jocelyne Pagé, 1998, page 21).

Le micromètre, ou vis micrométrique, est un instrument encore plus précis que le pied à coulisse. Le micromètre comporte une double graduation qui permet généralement d'atteindre une précision de 0,01 mm. L'incertitude absolue des mesures effectuées au

micromètre est la même que pour le pied à coulisse, c'est-à-dire égale à la plus petite variation de grandeur mesurable par l'instrument.

Chronomètre

Afin de mesurer des intervalles de temps, on utilise souvent des chronomètres à affichage numérique qui ont habituellement une précision d'un centième de seconde. La règle pour l'incertitude des instruments à affichage numérique donnerait donc une incertitude absolue de 0,01 seconde. Est-ce bien raisonnable? Non, parce que les réflexes de l'expérimentateur ou de l'expérimentatrice qui manipule le chronomètre sont bien plus lents. De plus, ils diffèrent d'une personne à l'autre. En fait, le même événement (par exemple, le temps que met une bille pour tomber d'une hauteur de deux mètres) mesuré par dix personnes différentes pourrait très bien donner dix résultats différents! Règle générale, il est raisonnable d'attribuer une incertitude de 0,1 s aux mesures effectuées à l'aide d'un chronomètre. Attention, dans certaines situations d'observation difficiles, il peut être préférable d'augmenter l'incertitude à 0,5 ou même à une seconde, selon le cas. Une autre option est de déterminer l'incertitude à l'aide des méthodes proposées pour les mesures non reproductibles (voir la section suivante). Dans tous les cas, utilisez votre bon sens!

3.6 Mesures non reproductibles

En principe, lorsqu'on répète plusieurs fois la même mesure, on devrait obtenir le même résultat. La mesure est alors reproductible. Mais dans certaines situations, il peut arriver que la répétition d'une même mesure donne des résultats différents; on dit alors que la mesure est non reproductible. Une mesure peut être non reproductible à cause de la combinaison d'un ou de plusieurs facteurs tels que l'irrégularité de l'objet à mesurer, la nature aléatoire du phénomène mesuré ou des conditions difficiles ou changeantes de la prise de mesure.

Incertitude d'une mesure non reproductible

Afin d'évaluer l'incertitude d'une mesure non reproductible, on utilise les valeurs extrêmes. Pour ce qui est de la valeur elle-même, on utilise la moyenne des mesures. Par exemple, on mesure le diamètre intérieur d'un tuyau et à cause de sa forme irrégulière, on obtient les différentes valeurs présentées ci-dessous :

Tableau 3.6.1: Diamètre intérieur d'un tuyau

mesure	diamètre $\pm 0,1$ mm
1	25,0
2	24,8
3	24,9
4	24,8
5	25,1
6	24,8
7	24,7
8	25,1

Pour utiliser la méthode des extrêmes, on examine l'ensemble des mesures afin d'identifier la plus grande et plus petite valeur possible en tenant compte des incertitudes des mesures. Selon le tableau 3.6.1, ces valeurs sont respectivement de 25,2 mm et 24,6 mm. On évalue ensuite l'incertitude comme étant égale à la moitié de l'écart entre ces deux valeurs extrêmes. Dans notre situation, l'écart est de 0,6 mm, l'incertitude étant donc de 0,3 mm. La moyenne des diamètres mesurés donne, quant à elle, 24,9 mm. On conclut donc que le diamètre intérieur du tuyau est de $(24,9 \pm 0,3)$ mm.

3.7 Calculs d'incertitude

Lorsqu'on effectue des calculs à partir de mesures, les incertitudes de ces dernières se propagent dans les calculs et affectent le résultat final, qui comportera lui aussi une incertitude. Il existe quelques méthodes pour déterminer la propagation des incertitudes dans les calculs. On en présentera deux : celle des règles simples et celle du calcul différentiel.

Méthode des règles simples

La méthode des règles simples est, comme son nom l'indique, simple à utiliser. Elle est toutefois limitée parce qu'elle ne peut être utilisée que pour des opérations simples comme l'addition, la soustraction, la multiplication et la division. Malgré cela, ces opérations sont très fréquentes et rendent tout de même utile l'apprentissage de la méthode des règles simples. Ces règles dépendent du type d'opération mathématique utilisé. On va voir les règles pour la somme et la différence de mesures, la multiplication par un facteur constant, le produit et le quotient de mesures et enfin les cas particuliers de l'exposant et de la racine carrée.

Addition et soustraction de mesures

Lorsqu'on additionne ou soustrait deux ou plusieurs mesures, l'incertitude absolue de la somme (ou la différence) est égale à la somme des incertitudes absolues des mesures.

Si a et b sont des mesures et Δa et Δb leurs incertitudes absolues respectives, alors :

$$c = a \pm b \Rightarrow \Delta c = \Delta a + \Delta b \quad (3.7.1)$$

On remarque qu'il faut *additionner* les incertitudes absolues, que l'opération soit une addition ou une soustraction.

Exemples

1. On additionne les masses de plusieurs substances pour trouver la masse totale :

$$m_1 = (2,34 \pm 0,01) \text{ g}$$

$$m_2 = (3,55 \pm 0,01) \text{ g}$$

$$m_3 = (0,121 \pm 0,001) \text{ g}$$

La masse totale est de

$$M = (2,34 + 3,55 + 0,121) \text{ g} = 6,011 \text{ g}$$

On additionne les incertitudes absolues et on obtient :

$$\Delta M = (0,01 + 0,01 + 0,001) \text{ g} = 0,021 \text{ g}$$

Puisqu'on arrondit habituellement l'incertitude absolue à un seul chiffre significatif et qu'on limite la précision du résultat à celle de son incertitude (voir la section 3.4 sur la présentation d'une mesure et de son incertitude), le résultat final est :

$$M = (6,01 \pm 0,02) \text{ g}$$

2. On souhaite connaître la distance d entre deux points à partir de deux mesures de position x_1 et x_2 :

$$x_1 = (6,34 \pm 0,01) \text{ m}$$

$$x_2 = (4,20 \pm 0,01) \text{ m}$$

La différence d est :

$$d = (6,34 - 4,20) \text{ m} = 2,14 \text{ m}$$

On additionne les incertitudes absolues et on obtient :

$$\Delta d = (0,01 + 0,01) \text{ m} = 0,02 \text{ m}$$

Le résultat final est donc :

$$d = (2,14 \pm 0,02) \text{ m}$$

Multiplication par un facteur constant

Il arrive très souvent que l'on doive multiplier (ou diviser) une mesure par un facteur constant, par exemple pour calculer un diamètre à partir d'un rayon ou l'inverse. La multiplication d'une mesure par un facteur constant multiplie également l'incertitude absolue du résultat par le même facteur.

Soit un facteur constant k et une mesure x et son incertitude Δx .

$$y = kx \Rightarrow \Delta y = k \cdot \Delta x \quad (3.7.2)$$

On remarque que la multiplication d'une mesure par un facteur constant n'affecte pas son incertitude relative (donc sa précision). En effet,

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{k \cdot \Delta x}{kx} = \frac{\Delta x}{x}$$

Exemples

1. On mesure le rayon d'un cercle et on calcule ensuite sa circonférence.

$$r = (3,6 \pm 0,1) \text{ cm}$$

On obtient la circonférence C en appliquant la formule :

$$C = 2\pi r = 2\pi \cdot 3,6 \text{ cm} = 22,619 \text{ cm}$$

On a donc :

$$\Delta C = 2\pi \cdot \Delta r = 2\pi \cdot 0,1 \text{ cm} = 0,628 \text{ cm}$$

L'application des règles habituelles de présentation donne comme résultat final :

$$C = (22,6 \pm 0,6) \text{ cm}$$

2. On mesure le temps nécessaire (t) pour qu'un pendule effectue 50 oscillations et on se sert de cette mesure pour déterminer la période d'oscillation du pendule (T). Supposons qu'on obtienne une mesure de

$$t = (46,44 \pm 0,20) \text{ s}$$

Manifestement, on a que :

$$T = \frac{1}{50} \cdot t = \frac{1}{50} \cdot 46,44 \text{ s} = 0,9288 \text{ s}$$

On a donc :

$$\Delta T = \frac{1}{50} \cdot \Delta t = \frac{1}{50} \cdot 0,20 \text{ s} = 0,004 \text{ s}$$

Et enfin :

$$T = (0,929 \pm 0,004) \text{ s}$$

Multiplication et division de mesures

La multiplication et la division de mesures sont des cas très fréquents. On n'a qu'à penser aux formules permettant de déterminer surfaces et volumes de figures géométriques, aux calculs de concentration, de densité, etc. Lorsqu'on multiplie ou divise des mesures, l'incertitude *relative* du produit (ou du quotient) est égale à la somme des incertitudes *relatives* des mesures.

Soit deux variables x et y et leurs incertitudes absolues respectives Δx et Δy .

$$z = xy \Rightarrow \frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y} \quad (3.7.3)$$

Il est à noter que la présence d'un facteur constant k n'affecte pas l'incertitude relative, on peut l'ignorer dans le calcul de l'incertitude d'un produit ou un d'un quotient.

$$z = kxy \Rightarrow \frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y} \quad (3.7.4)$$

Exemples

1. On mesure le volume V et la masse m d'un liquide afin de déterminer sa masse volumique ρ .

On obtient les mesures suivantes :

$$V = (22,4 \pm 0,1) \text{ ml}$$

$$m = (28,9 \pm 0,1) \text{ g}$$

On calcule la masse volumique de la manière suivante :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{28,9 \text{ g}}{22,4 \text{ ml}} = 1,290 \text{ g/ml}$$

On applique ensuite la règle pour le quotient de mesures :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta V}{V} = \frac{0,1 \text{ g}}{28,9 \text{ g}} + \frac{0,1 \text{ ml}}{22,4 \text{ ml}} = 0,00792$$

On a donc :

$$\Delta \rho = 0,00792 \rho = 0,00792 \cdot 1,290 \text{ g/ml} = 0,0102 \text{ g/ml}$$

L'application des règles habituelles de présentation donne comme résultat final :

$$\rho = (1,29 \pm 0,01) \text{ g/ml}$$

2. On mesure le diamètre et la hauteur d'un cylindre afin de déterminer la surface de son contour.

Les mesures obtenues sont :

$$d = (2,4 \pm 0,1) \text{ cm}$$

$$h = (13,1 \pm 0,1) \text{ cm}$$

On calcule la surface S du contour de la manière suivante :

$$S = \pi dh = \pi \cdot 2,4 \text{ cm} \cdot 13,1 \text{ cm} = 98,77 \text{ cm}^2$$

On applique ensuite la règle pour le produit de mesures (on se rappelle qu'on peut ignorer le facteur constant) :

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta h}{h} = \frac{0,1 \text{ cm}}{2,4 \text{ cm}} + \frac{0,1 \text{ cm}}{13,1 \text{ cm}} = 0,0493$$

On a donc :

$$\Delta S = 0,0493 S = 0,0493 \cdot 98,77 \text{ cm}^2 = 4,87 \text{ cm}^2$$

L'application des règles habituelles de présentation donne comme résultat final :

$$S = (99 \pm 5) \text{ cm}^2$$

Exposants et racines

Pour les puissances, la règle est la même que pour les produits. En effet, élever une variable à une certaine puissance revient à multiplier cette variable par elle-même à plusieurs reprises.

De manière générale, si

$$y = kx^n,$$

où k et n sont des constantes et x une mesure à laquelle est associée une incertitude Δx , alors,

$$\frac{\Delta y}{y} = n \frac{\Delta x}{x} \quad (3.7.5)$$

Par ailleurs, les racines pouvant être considérées comme des exposants fractionnaires, on peut appliquer la règle précédente en utilisant $n = 1/2$, $1/3$, etc. selon le type de racine.

Exemples

1. On mesure le rayon r d'une sphère afin de déterminer son volume V .
On obtient la mesure suivante :

$$r = (5,2 \pm 0,1) \text{ cm}$$

On calcule le volume de la sphère ainsi :

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} = \frac{4\pi}{3} \cdot (5,2 \text{ cm})^3 = 588,977 \text{ cm}^3$$

On applique ensuite la règle pour les exposants en se rappelant qu'on peut ignorer le facteur constant :

$$\frac{\Delta V}{V} = n \frac{\Delta r}{r} = 3 \frac{0,1 \text{ cm}}{5,2 \text{ cm}} = 0,0577$$

On a donc :

$$\Delta V = 0,0577 V = 0,0577 \cdot 588,977 \text{ cm}^3 = 34,0 \text{ cm}^3$$

Ce qui nous donne le résultat final :

$$V = (589 \pm 34) \text{ cm}^3$$

Dans cette situation, on a choisi de conserver deux chiffres significatifs à l'incertitude absolue afin d'éviter de perdre de l'information. Il aurait aussi été correct d'arrondir le résultat final et son incertitude à la dizaine près.

2. On lâche une pierre d'une hauteur de $(1,50 \pm 0,05)$ m dans un environnement sans air. On souhaite déterminer la durée de la chute de la pierre et son incertitude.

À partir des lois de la dynamique, on peut montrer que la durée de chute t , est donnée par :

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

où g est considéré comme une constante égale à $9,8 \text{ m/s}^2$.

On a donc :

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,50 \text{ m}}{9,8 \text{ m/s}^2}} = 0,553 \text{ s}$$

L'application de la règle des exposants, conjointement à celle des facteurs multiplicatifs, donne :

$$\frac{\Delta t}{t} = n \cdot \frac{\Delta h}{h} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,05 \text{ m}}{1,50 \text{ m}} = 0,0167 \text{ s}$$

On a donc :

$$\Delta t = 0,0167 t = 0,0167 \cdot 0,553 \text{ s} = 0,0092 \text{ s}$$

Ce qui nous donne le résultat final :

$$t = (0,553 \pm 0,009) \text{ s}$$

Il est à noter que cette durée est théorique. En pratique, il serait difficile de concevoir une expérience qui mesurerait un temps de chute avec une telle précision.

Méthode du calcul différentiel : cas à une variable

Bien que facile à utiliser, la méthode des règles simples est parfois limitée par le type d'expression mathématique rencontrée. En effet, cette méthode n'est utilisable que pour les opérations mathématiques de base et est incapable d'aborder la propagation des incertitudes pour des fonctions exponentielles, logarithmiques, sinusoïdales ou ayant une forme particulière.

La méthode du calcul différentiel est une méthode qui permet, au prix d'un niveau de complexité légèrement plus grand, de traiter la propagation des incertitudes pour n'importe quel type de relation mathématique¹. Soit une mesure x qui sert à calculer une quantité y , Δx et Δy étant les incertitudes respectives de ces quantités. On souhaite déterminer l'incertitude Δy à partir des autres paramètres et surtout de la relation mathématique entre x et y . Puisque les incertitudes peuvent être considérées comme des variations des quantités x et y , et que la pente d'un segment de droite ou d'une fonction peut être donnée par le ratio $\Delta y/\Delta x$ ou encore la dérivée, on se convainc assez aisément que si les incertitudes ne sont pas trop grandes, on alors que:

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} \approx \frac{dy}{dx}. \quad (3.7.6)$$

En réorganisant cette expression et en ajoutant une valeur absolue pour éviter de se retrouver avec des incertitudes négatives, on trouve enfin la relation suivante :

$$\Delta y = \left| \frac{dy}{dx} \right| \Delta x. \quad (3.7.7)$$

L'équation 3.7.7 permet de calculer comment l'incertitude sur une quantité x affecte l'incertitude d'une quantité y tout en tenant compte de la relation entre ces deux variables.

Exemples

1. On va reprendre le premier exemple de la section précédente. On souhaite déterminer le volume d'une sphère et l'incertitude associée à partir de la mesure du rayon qui était de :

$$r = (5,2 \pm 0,1) \text{ cm}$$

On calcule le volume de la sphère ainsi :

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} = \frac{4\pi}{3} \cdot (5,2 \text{ cm})^3 = 588,977 \text{ cm}^3$$

¹ En réalité, il faut que la relation qui unit les variables soit assimilable à une fonction dérivable, ce qui est généralement le cas pour les situations réelles.

On cherche la relation entre ΔV et Δr à partir de l'équation 3.7.7 dans laquelle x et y sont respectivement devenus r et V :

$$\Delta V = \left| \frac{dV}{dr} \right| \Delta r = \left| \frac{d}{dr} \left(\frac{4\pi r^3}{3} \right) \right| \Delta r = 4\pi r^2 \Delta r = 34,0 \text{ cm}^3$$

Ce qui nous donne le résultat final :

$$V = (589 \pm 34) \text{ cm}^3$$

On remarque que le résultat obtenu est exactement le même qu'avec la méthode des règles simples. L'exemple suivant permet de s'attaquer à un problème qui ne peut être traité autrement qu'avec la méthode du calcul différentiel.

2. Un canon lance des projectiles à une vitesse initiale constante de 220 m/s. Le canon est très précis quant à la vitesse, mais son alignement vertical comporte une incertitude de 5° . Sachant que la portée d d'un canon en fonction de sa vitesse de tir initiale v_0 et de l'angle de tir est donnée par

$$d = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\theta,$$

déterminer la portée du canon et l'incertitude associée pour un tir effectué avec un angle de 35° . Attention, lorsqu'on utilise une valeur d'angle dans un calcul, celle-ci doit être exprimée en radians.

On calcule d'abord la portée, ce qui nous donne :

$$d = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\theta = \frac{(220 \text{ m/s})^2}{9,8 \text{ m/s}^2} \sin(2 \cdot 35^\circ) = 4641 \text{ m}$$

On calcule ensuite l'incertitude sur la portée à l'aide de l'équation 3.7.7 :

$$\begin{aligned} \Delta d &= \left| \frac{dd}{d\theta} \right| \Delta\theta = \left| \frac{d}{d\theta} \left(\frac{v_0^2}{g} \sin 2\theta \right) \right| \Delta\theta = \frac{2v_0^2}{g} \cos 2\theta \Delta\theta \\ &= \frac{2(220 \text{ m/s})^2}{9,8 \text{ m/s}^2} \cos(2 \cdot 35^\circ) \cdot 5^\circ \times \frac{\pi}{180^\circ} = 295 \text{ m} \end{aligned}$$

Le résultat final est donc :

$$d = (4,6 \pm 0,3) \text{ km}$$

Ce résultat montre donc qu'un canon doit avoir une bonne précision sur son angle de tir pour atteindre sa cible.

Méthode du calcul différentiel : cas à plusieurs variables

La méthode du calcul différentiel présentée dans la section précédente ne peut être utilisée que lorsque la quantité à calculer ne dépend que d'une seule mesure. Or, il arrive très souvent que plusieurs mesures, chacune ayant sa propre incertitude, contribuent au résultat d'un calcul. On n'a qu'à penser à la surface d'un rectangle qui dépend de sa longueur et de sa largeur ou le volume d'un cylindre qui dépend de sa hauteur et de son rayon. Pour traiter les cas à plusieurs variables à l'aide du calcul différentiel, on utilise le concept de différentielle totale. Pour une fonction y qui dépend de plusieurs variables x_1, x_2, \dots, x_n , la différentielle totale est définie comme

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} dx_n. \quad (3.7.8)$$

On adapte ensuite cette formule en interprétant les différentielles comme des incertitudes et on utilise le symbole de sommation pour abréger la présentation :

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} \right| \Delta x_i \quad (3.7.9)$$

Exemples

1. On souhaite déterminer le volume d'un cylindre à partir des mesures de sa hauteur et de son rayon. Les mesures donnent respectivement

$$h = (15 \pm 1) \text{ cm}$$

$$r = (4,0 \pm 0,1) \text{ cm}$$

Le volume se détermine de la manière suivante :

$$V = \pi r^2 h = \pi \cdot (15 \text{ cm})^2 \cdot 4,0 \text{ cm} = 2827,4 \text{ cm}^3.$$

L'incertitude associée donne quant à elle :

$$\Delta V = \frac{\partial V}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial V}{\partial r} \Delta r = \pi r^2 \cdot \Delta h + 2\pi r h \cdot \Delta r = 88,0 \text{ cm}^3.$$

Le résultat final est donc :

$$V = (2830 \pm 90) \text{ cm}^3$$

On vérifie aisément qu'on aurait obtenu le même résultat avec la méthode des règles simples. L'exemple suivant permet de traiter un cas qui ne peut être résolu qu'avec la technique du calcul différentiel pour plusieurs variables.

2. Le nombre de bactéries d'un échantillon peut croître très rapidement. Dans des conditions favorables, des bactéries d'*E. coli* se multiplient à un rythme tel que leur population peut doubler aux 20 minutes (Louise Martin, 2012, page 95). On a

pu vérifier que pour un échantillon donné le nombre de bactéries n après un temps t (en minutes) est donné par la formule :

$$n = n_0 e^{at}$$

où n_0 désigne le nombre de bactéries au temps initial et a un paramètre associé aux taux de croissance de la population. Sachant que

$$n_0 = 10 \pm 1$$

et

$$a = (0,035 \pm 0,001) \text{ min}^{-1},$$

déterminer la taille de la population de bactérie et son incertitude après une durée de 12 heures.

On commence par calculer la taille de la population :

$$n = n_0 e^{at} = 10 \cdot e^{0,035 \text{ min}^{-1} \cdot 720 \text{ min}} = 10 \cdot e^{25,2} = 8,79 \times 10^{11}$$

Après seulement une demi-journée, un groupe initial d'une dizaine de bactéries peut atteindre une population de plusieurs centaines de milliards de bactéries! Déterminons maintenant l'incertitude sur cette quantité. Selon l'équation 3.7.9, on a :

$$\Delta n = \frac{\partial n}{\partial n_0} \Delta n_0 + \frac{\partial n}{\partial a} \Delta a = e^{at} \cdot \Delta n_0 + n_0 t e^{at} \cdot \Delta a = (\Delta n_0 + n_0 t \cdot \Delta a) e^{at}$$

$$\Rightarrow \Delta n = 7,2 \times 10^{11}.$$

Le résultat final est donc de

$$n = (9 \pm 7) \times 10^{11}.$$

On constate sans étonnement que l'incertitude sur la taille de la population est presque aussi grande que la population elle-même. En effet, puisque le nombre de bactéries croît exponentiellement, il est normal que l'incertitude croisse elle aussi très rapidement. Bien qu'imprécis, le résultat final fournit tout de même un ordre de grandeur approximatif de la taille de la population après 12 heures : un million de millions de bactéries!

4. Présentation des observations et résultats

4.1 Introduction

Les connaissances scientifiques sont construites à partir d'observations effectuées sur le réel. Dans le cadre d'une expérience scientifique, les observations sont généralement répétées un grand nombre de fois en faisant varier des paramètres comme le lieu et le moment de la prise de mesure, l'échantillon analysé, etc. De plus, les observations directes qui sont effectuées servent souvent à calculer d'autres quantités qui mèneront éventuellement aux résultats finaux d'une expérience. L'ensemble des observations et résultats associés à une expérience représente une grande quantité d'informations. Présenter ces informations de manière claire et concise peut constituer un défi. Ce chapitre a pour objectif de montrer les différentes façons de présenter des observations et des résultats selon un format clair, uniforme et conforme aux pratiques généralement admises dans le domaine scientifique.

L'uniformisation des exigences relatives à la présentation des observations et des résultats permet de simplifier le travail des étudiants et étudiantes en limitant la trop grande diversité de consignes d'un cours de science à un autre. Il est en effet frustrant pour un étudiant ou une étudiante d'avoir à se conformer à autant de styles de présentation des travaux que de professeurs différents. L'uniformisation a toutefois ses limites et même si les professeurs du programme respecteront généralement les règles de présentation de ce chapitre, il se peut qu'ils ou elles aient parfois des exigences différentes pour s'adapter à un contexte spécial ou aux normes de présentation spécifiques à un domaine en particulier.

Les outils de présentation utilisés pour présenter les observations et les résultats scientifiques doivent être adaptés à leur caractère répétitif et généralement quantitatif. Ainsi, les principaux outils de présentation utilisés sont les tableaux et les graphiques. Les tableaux permettent de regrouper de manière ordonnée un grand nombre d'informations, qu'elles soient qualitatives ou quantitatives alors que les graphiques, par leur caractère visuel, permettent de saisir en un simple coup d'œil des relations parfois complexes entre diverses quantités. Les sections qui suivent présentent successivement les règles de présentation des tableaux, des figures, des graphiques, des diagrammes de comparaison et des équations.

4.2 Tableaux

Les tableaux permettent de présenter de l'information de manière organisée sous forme de lignes et de colonnes. L'orientation du tableau dépend du type d'information qu'il contient. Si les données sont de nature répétitive, on utilise un tableau structuré en colonnes de valeurs de même type. Si les données sont uniques, c'est-à-dire qu'une seule valeur peut être associée à chaque grandeur, on utilise alors un tableau structuré en lignes (voir ci-dessous un tableau à données répétitives et un tableau à données uniques).

Tableau 4.2.1. Densité moyenne et hauteur moyenne de verges d'or (*Solidago* sp.) dans trois milieux aux îles-de-la-Madeleine (tableau à valeurs répétitives).

Type de milieu	Densité moyenne nombre de plants/m ²	Hauteur moyenne cm
Boisé	3	52
Ouvert	6	76
Bord de route	8	63

Échantillonnage effectué le 22 septembre 2022

Tableau 4.2.2. Paramètres atmosphériques lors de l'inventaire de verges d'or (tableau à valeurs uniques)

Température extérieure	(28 ± 1) °C
Pression atmosphérique	(101,2 ± 0,2) kPa
Vitesse du vent	(15 ± 5) km/h

Normes générales de présentation des tableaux

Certaines règles sont communes à tous les types de tableaux :

- Les tableaux doivent être numérotés selon un système cohérent.
- Les tableaux doivent porter un titre qui accompagne le numéro de tableau. Le titre doit informer le lecteur au sujet du contenu du tableau. Il faut éviter les titres trop vagues comme « Mesures de l'expérience ».
- Si nécessaire, un tableau peut comporter une légende pour expliciter la signification des symboles utilisés (voir le tableau 4.2.1).

Tableaux à valeurs répétitives

Les tableaux à valeurs répétitives sont structurés en colonnes. Chaque colonne comporte un entête qui comprend généralement le nom ou l'abréviation de la quantité, son unité

de mesure et l'incertitude si elle est la même pour toutes les valeurs de la colonne. Si l'incertitude diffère d'une valeur à l'autre, il sera nécessaire de prévoir une colonne supplémentaire. Toutes les valeurs du tableau doivent être présentées avec un nombre de chiffres significatifs qui représente leur précision réelle. Il est impératif que la précision des données soit la même que celle de l'incertitude associée (voir la section 3.4 sur la présentation des mesures et de leurs incertitudes pour plus de détails). Il faut choisir une unité appropriée au contexte afin d'éviter les nombres trop grands ou trop petits. L'utilisation de la notation scientifique n'est pas recommandée et la notation d'Excel de la forme 9,99E±09 n'est absolument pas acceptable. Si l'utilisation de la notation scientifique est inévitable, on reporte la puissance dans l'entête avec l'unité de mesure. Enfin, on peut choisir de réduire l'entête à deux lignes en combinant la présentation de l'unité et de l'incertitude. Le tableau 4.2.3 permet de visualiser chacune des règles relatives à la présentation des tableaux à valeurs répétées.

L'entête est formé de trois lignes: nom, unité et incertitude.

L'unité choisie est appropriée pour l'ordre de grandeur.

L'exposant de la notation scientifique est reporté dans l'entête.

Une colonne supplémentaire est prévue pour une incertitude variable. Son unité est la même que la quantité associée.

Tableau 4.2.3. Tension aux bornes d'une résistance (ΔV), courant (I) et nombre de charges (n) qui la traversent et puissance dissipée (P)

ΔV	I	n	P	ΔP
V	mA	$\times 10^{15} \text{ s}^{-1}$	mW	mW
± 0,01	± 0,01	± 0,06		
0,80	0,53	0,32	0,427	0,005
0,93	0,62	0,37	0,577	0,006
1,24	0,83	0,50	1,025	0,008
2,76	1,84	1,11	5,08	0,02
6,19	4,13	2,49	25,54	0,04
6,36	4,24	2,55	26,97	0,04
8,92	5,95	3,58	53,04	0,06

Chaque quantité possède la même précision que son incertitude.

L'incertitude absolue est arrondie à un seul chiffre significatif.

Tableaux à valeurs uniques

Dans certaines situations, un tableau peut servir à présenter un ensemble de données indépendantes les unes des autres. On structure alors le tableau en lignes plutôt qu'en colonnes. Le tableau 4.2.2 était un bon exemple de tableau à valeurs uniques. En voici un autre :

Tableau 4.2.4. Caractéristiques physiques de la planète Mars

Masse	$(6,42 \pm 0,02) \times 10^{23} \text{ kg}$
Rayon moyen	$(3\,389,5 \pm 0,2) \text{ km}$
Densité moyenne	$(3,93 \pm 0,01) \text{ g/cm}^3$
Accélération gravitationnelle	$(3,71 \pm 0,05) \text{ m/s}^2$

On remarque que chaque grandeur est accompagnée de son unité et de son incertitude. La grandeur et son incertitude sont toujours exprimées avec la même précision.

4.3 Figures

L'utilisation d'images, de schémas ou d'autres informations de type visuel peut grandement améliorer la clarté d'une explication. Tout élément visuel ajouté à une rédaction scientifique est appelé une figure. Celle-ci doit être numérotée et posséder un titre qui renseigne le lecteur sur le contenu de la figure. Le titre de la figure est placé *en dessous* de celle-ci. Si la figure n'a pas été créée par l'auteur, les règles habituelles pour les citations et références s'appliquent. Voici un exemple de figure avec son titre :

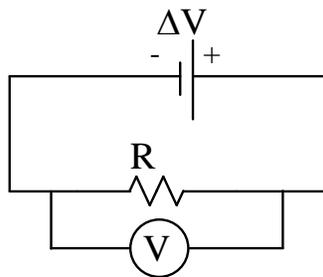


Figure 4.3.1. Méthode de branchement d'un voltmètre

4.4 Graphiques

Les graphiques permettent de présenter de l'information de manière visuelle et de saisir en un simple coup d'œil des relations parfois complexes entre diverses quantités. Les

graphiques facilitent grandement l'analyse des résultats. Il existe plusieurs types de graphiques qu'on peut utiliser selon le type de données à présenter : des nuages de points pour la relation entre deux variables, des diagrammes à bandes lorsqu'une des deux variables n'est pas quantitative, des histogrammes pour les distributions de valeurs continues et des graphiques circulaires pour les proportions. Dans tous les cas, les graphiques sont des *figures*, ils doivent donc être identifiés comme tels et suivis d'un titre qui décrit leur contenu. De plus, les règles suivantes doivent être respectées (certaines règles ne s'appliquent pas à tous les types de graphiques, notamment les circulaires) :

- La présentation générale doit être simple et sobre.
- Les axes doivent être identifiés avec un titre approprié suivi de l'unité utilisée entre parenthèses.
- Les axes doivent être gradués à l'aide de multiples de 1, 2 ou 5.
- Les graduations doivent être choisies pour que les points occupent une grande partie de la surface disponible.
- Plusieurs formes de points peuvent être acceptées pourvu que le résultat soit clair, lisible et sobre.
- Des barres d'erreurs doivent être utilisées si l'incertitude des points est connue. Avec des barres d'erreur, il est préférable de ne pas utiliser de marqueur pour les points.
- Dans plusieurs situations, il est pertinent d'inclure une courbe de tendance. On l'accompagne généralement de son équation et du coefficient de corrélation R^2 . Assurez-vous que ces quantités soient exprimées à l'aide d'un nombre suffisant de chiffres significatifs.

Voici quelques exemples de graphiques bien présentés.

Nuage de points

Les nuages de points permettent de visualiser aisément la relation qui existe entre deux variables. Une courbe de tendance permet de quantifier cette relation.

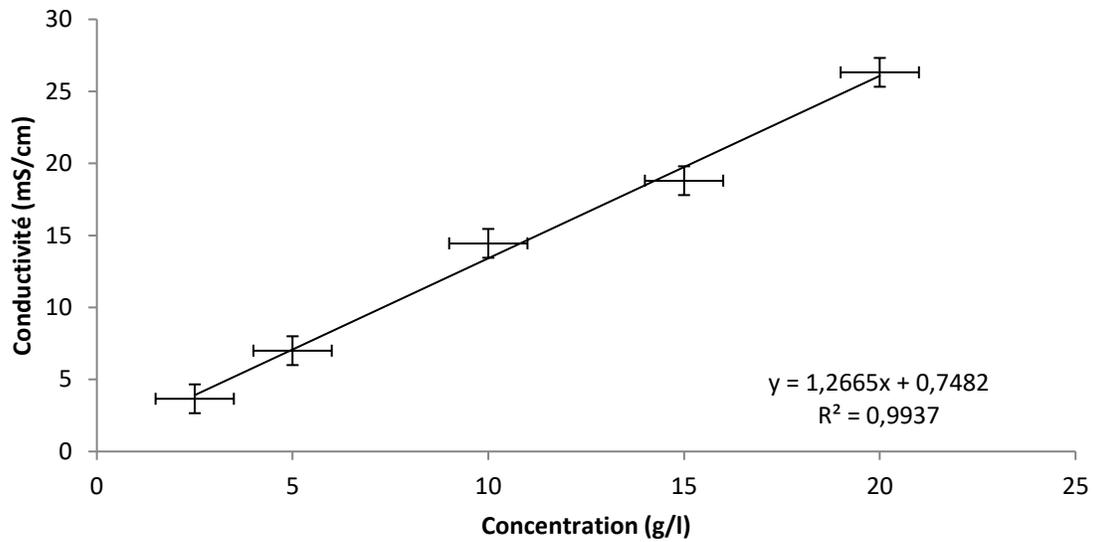


Figure 4.4.1. Conductivité de la solution en fonction de sa concentration en sel.

Diagramme à bandes

Les diagrammes à bande sont utilisés pour comparer des quantités qui se distinguent par une variable non quantitative, comme dans l'exemple ci-dessous.

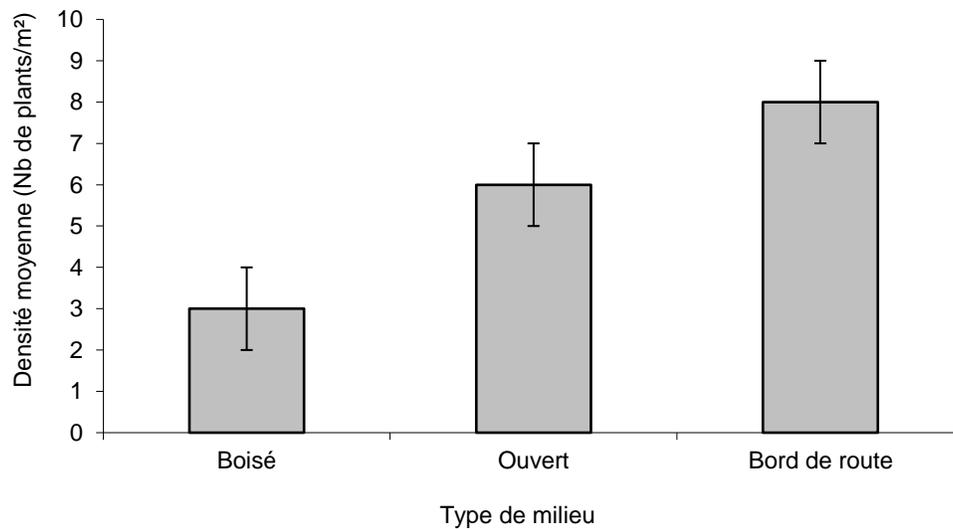


Figure 4.4.2. Densité de plants de verges d'or (*Solidago sp.*) selon le type de milieu aux îles-de-la-Madeleine.

Histogramme

Les histogrammes permettent de représenter visuellement la distribution d'une valeur numérique continue, chaque bande correspondant à un intervalle de la distribution.

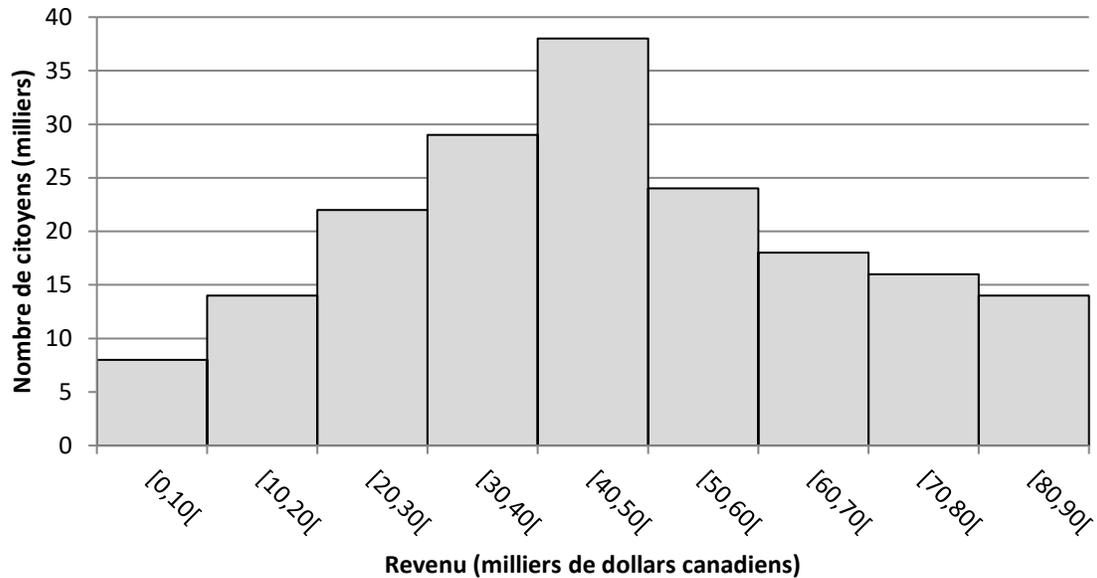


Figure 4.4.3. Répartition du revenu au Canada en 2022 (données fictives).

Graphique circulaire

Les graphiques circulaires sont particulièrement bien adaptés pour visualiser des proportions.

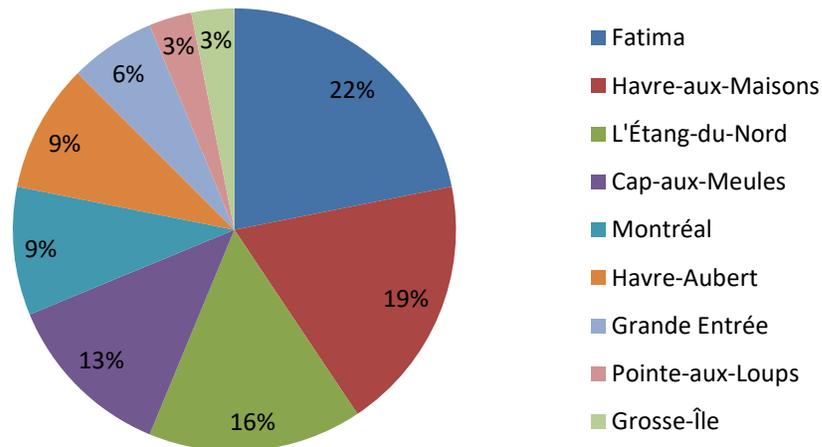


Figure 4.4.4. Provenance des étudiants en sciences de la nature au Campus des Îles en 2023 (données fictives).

4.4 Diagrammes de comparaison

Il arrive souvent qu'on souhaite comparer deux valeurs et leurs domaines d'incertitude. Le chevauchement de ces domaines d'incertitudes permet de conclure que deux résultats concordent alors que l'absence de chevauchement indique que les deux valeurs diffèrent. Le diagramme de comparaison permet de visualiser clairement ces deux situations. Voici un exemple dans lequel on compare deux mesures de la vitesse effectuées par des méthodes différentes, l'une avec l'effet Doppler et l'autre à partir de la position :

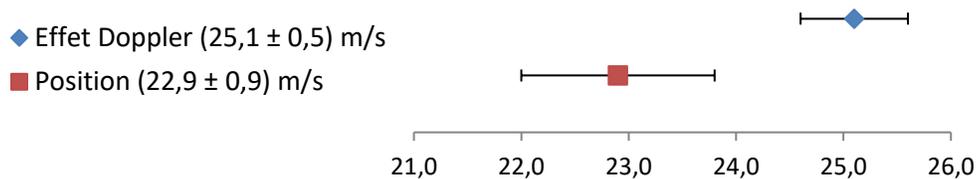


Figure 4.4.1. Diagramme de comparaison des mesures de vitesse - chevauchement

Un simple coup d'œil suffit pour constater que les domaines d'incertitude des deux mesures ne se chevauchent pas. Pour créer un diagramme de comparaison, il faut utiliser un graphique de type nuage de points dont on a retiré l'axe vertical et pour lequel il y a autant de séries de données que de valeurs à comparer.

4.5 Équations

Il arrive souvent que des équations soient présentes dans un travail scientifique. Les équations ne doivent pas être insérées dans le texte, mais présentées seules, sur une ligne à part, centrées et numérotées. Ainsi, l'équation qui permet de calculer le volume d'une sphère, $V = \frac{4\pi r^3}{3}$, ne doit pas être insérée dans la phrase comme dans cet exemple, mais présentée sur une ligne à part, comme ceci :

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} \quad (4.5.1)$$

De plus, il faut utiliser les symboles mathématiques adéquats et éviter les caractères approximatifs comme le ^ pour l'exposant ou le * pour la multiplication. Enfin, les équations doivent être préparées avec un outil approprié, tel que l'éditeur d'équations de Microsoft Word.

5. Rédaction d'un rapport de laboratoire

5.1 Importance et types de communications scientifiques

Le savoir scientifique est un vaste ensemble de connaissances interreliées qui ont été produites de manière cumulative, chaque nouvelle connaissance s'appuyant sur les précédentes et servant de base à la production de connaissances futures. Deux conditions sont nécessaires à la construction d'un tel échafaudage: la contribution de nombreux scientifiques et le *partage* des connaissances acquises entre eux. En effet, les découvertes géniales gardées pour soi sont perdues et l'absence de communication condamne chaque génération de scientifique à sans cesse réinventer la roue. La communication des résultats scientifiques est donc une condition *essentielle* à la construction du savoir scientifique.

Il existe plusieurs types de communications scientifiques adaptés à différents contextes. Ce chapitre présente de manière générale l'article, l'affiche et le rapport scientifiques et aborde ensuite dans le détail la rédaction d'un rapport scientifique, le type de communication scientifique le plus utilisé au niveau collégial.

L'article scientifique

Les grands textes scientifiques fondateurs tels que *Philosophiae naturalis principia mathematica* (Sir Isaac Newton, 1687), le *Traité élémentaire de chimie* (Antoine Lavoisier, 1789) ou *On the Origin of Species* (Charles Darwin, 1859) étaient de longs ouvrages écrits sur plusieurs années et constituaient souvent l'œuvre d'une vie pour leurs auteurs. Aujourd'hui, le principal mode de communication employé par les scientifiques est l'article scientifique. L'article scientifique est un texte généralement court (moins de vingt pages) qui permet de communiquer des résultats scientifiques nouveaux, la démarche qui a permis de les obtenir et le cadre théorique général dans lequel s'insèrent ces résultats. Les articles sont publiés dans des revues scientifiques spécialisées telles que *Nature*, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, *Advances in Organometallic Chemistry* ou *Progress in Particle and Nuclear Physics*. Avant d'être publié, un article doit être approuvé par un comité de révision formé de spécialistes du domaine concerné. Ce comité peut accepter la publication de l'article tel quel, recommander des modifications ou encore simplement le rejeter. Ce mécanisme de révision par les pairs vise à assurer la qualité des articles, et donc ultimement celle de la valeur des connaissances scientifiques.

L'affiche scientifique

L'affiche est un moyen de communication et de vulgarisation scientifiques de plus en plus utilisé dans le domaine des sciences (Réjane Gélinas, s.d., p. 23). Ce mode de communication est souvent utilisé dans les congrès et les colloques scientifiques ainsi que lors d'activités de vulgarisation destinées à un plus large public.

« L'affiche est un outil de communication visuelle, utilisant des textes concis, des images et des graphiques en complémentarité avec le texte, pour exposer un sujet d'une façon synthétique et attrayante. » (Réjane Gélinas, s.d., p. 1). Ce mode de communication, qui rallie texte et image et qui s'appuie également sur l'oral permet « une transmission rapide et fort dynamique de connaissances scientifiques les plus récentes » (Réjane Gélinas, s.d., p. 1).

Le contenu d'une affiche correspond aux différentes étapes de la méthode scientifique, de l'exposition de la problématique et la formulation de l'hypothèse jusqu'à l'interprétation des résultats et la présentation des conclusions finales.

Le rapport de laboratoire

Le rapport scientifique, communément appelé rapport de laboratoire, est la forme de communication scientifique la plus utilisée au niveau collégial. Le rapport est aussi un mode de communication utilisé par les entreprises et les institutions publiques pour publier leurs résultats (à l'interne pour les entreprises). Le rapport de laboratoire présente des résultats plus bruts et qui ont une portée moins large que l'article scientifique. De plus, il n'apporte pas nécessairement de contribution nouvelle au savoir scientifique, particulièrement dans le milieu académique où il a des fonctions surtout pédagogiques. Pour cette raison, le rapport de laboratoire de type académique contient souvent plus de détails (des exemples de calcul notamment) qu'un rapport officiel publié par une agence gouvernementale. Dans tous les cas, un bon rapport doit présenter toutes les étapes de la démarche scientifique et reprend essentiellement les mêmes parties qu'un article scientifique, quoique sous une forme différente. Les détails concernant la structure générale et le contenu d'un rapport de laboratoire sont présentés dans la section 5.3 Contenu détaillé d'un rapport de laboratoire.

5.2 Style de rédaction

L'objectif d'un rapport de laboratoire est de rendre compte de la démarche et des résultats d'une expérience scientifique avec suffisamment de précision pour que celle-ci puisse être comprise et répétée. Afin d'atteindre cet objectif, il est important que le style

de rédaction soit clair, précis, concis, objectif et impersonnel. Ainsi, il faut privilégier l'utilisation de phrases simples qui vont directement au but. « Un rapport de laboratoire bien écrit est dépourvu de fioritures ou de digressions. N'utilisez pas de tournures narratives, appréciatives ou littéraires, qui, en plus d'être inadéquates dans ce genre d'écrit, allongent inutilement l'exposé et détournent l'attention de ses éléments importants » (CCDMD, 2013, p. 11).

Trucs de rédaction et exemples

Voici une série de trucs de rédaction de style scientifique et quelques exemples qui permettent de les illustrer. Les trucs et exemples sont tirés ou inspirés de CCDMD (2013, pages 4 à 13) et Gastonguay, Giguère et Laurin (2015) (2015, p.7).

- Rédigez au présent et n'utilisez les autres temps que si la logique l'exige.

Par exemple, plutôt que:

Les résultats confirmèrent l'hypothèse initiale.

On écrira :

Les résultats confirment l'hypothèse initiale.

- Évitez d'utiliser les pronoms et déterminants de la première personne (je, nous, notre, mon, etc.).

Par exemple, plutôt que:

Notre mesure de l'accélération gravitationnelle est inférieure à la valeur attendue.

On écrira :

L'accélération gravitationnelle mesurée est inférieure à la valeur attendue.

- Construisez des phrases dont le sujet réfère à des notions théoriques, à des substances manipulées, à des résultats.

Par exemple, plutôt que:

Nous savons que les molécules de la caféine se fixent aux récepteurs de l'adénosine.

On écrira :

Les molécules de la caféine se fixent aux récepteurs de l'adénosine.

- Évitez la surcharge de détails inutiles, les mots d'esprit et les commentaires personnels.

Par exemple, plutôt que:

Nous avons patienté de longues minutes en attendant que la température daigne atteindre la valeur désirée.

On écrira :

(rien).

- Évitez les verbes, noms, adverbess ou adjectifs appréciatifs tels que: adorer, stupéfaction, malheureusement, fascinant, etc.

Par exemple, plutôt que:

Une douce teinte bleutée s'est développée timidement dans la solution. Ce résultat pour le moins intrigant nous a stupéfiés.

On écrira :

Une teinte bleue s'est développée dans la solution. Ce résultat n'était pas prévu.

- Utilisez des verbes qui réfèrent à une action scientifique, tels que vérifier, valider ou mesurer, et non des verbes exprimant des objectifs pédagogiques, tels qu'apprendre et maîtriser.

Par exemple, plutôt que:

L'expérience consiste à apprendre quel est le taux de caféine dans différents types d'infusions.

On écrira :

L'expérience consiste à mesurer le taux de caféine selon différents types d'infusions.

5.3 Contenu détaillé d'un rapport de laboratoire

Selon le CCDMD (2013, p.2), « le rapport de laboratoire est un document écrit destiné à rendre compte d'une démarche expérimentale dans un domaine scientifique. Il énonce une hypothèse fondée sur des principes théoriques, décrit toutes les étapes de l'expérience réalisée dans le but de tester cette hypothèse, présente les résultats obtenus et en propose une interprétation [liée à] la théorie. » Le rapport de laboratoire est séparé en sections qui reprennent les différentes étapes de la démarche scientifique de la formulation de l'hypothèse jusqu'aux conclusions finales. Le contenu et la manière de regrouper les sections peuvent légèrement différer d'une discipline à l'autre. Le tableau 5.3.1 résume les sections habituellement présentes dans un rapport de laboratoire, selon le type de discipline.

Tableau 5.3.1 : Sections présentes dans un rapport de laboratoire, selon la discipline

Sections du rapport de laboratoire	Biologie	Chimie	Physique
Introduction	X	X	
But			X
Théorie	≈	≈	X
Méthodologie	X	X	X
Matériel		X	≈
Manipulations		≈	≈
Résultats	X	X	X
Discussion	X	X	X
Conclusion	X	X	X
Bibliographie	X	≈	≈
Annexes	≈	≈	≈

X : section présente

≈ : section parfois présente

Certaines sections ne sont pas toujours présentes. Le type de rapport de laboratoire, ses objectifs pédagogiques et l'enseignant qui donne le cours sont tous des facteurs qui peuvent faire en sorte que la présence d'une section est requise ou non. Ces facteurs peuvent également entraîner d'autres modifications à la structure du rapport. Il est important de vérifier auprès des enseignants les exigences relatives à chaque rapport de laboratoire. Aussi, comme pour n'importe quel travail au niveau collégial, un rapport de laboratoire est précédé d'une page de présentation.

Le contenu de chaque section d'un rapport de laboratoire est précisé ci-dessous. Les regroupements possibles et les variations interdisciplinaires sont également présentés.

Introduction

L'introduction est présente dans les rapports de biologie et de chimie. Elle est structurée selon le format sujet amené, posé et divisé. L'introduction sert à présenter le sujet, à

montrer son intérêt et à le situer à l'intérieur d'une problématique plus large. Les buts de l'expérience doivent être clairement énoncés et les hypothèses (s'il y a lieu) doivent être plausibles, précises, vérifiables et bien formulées. Des éléments de théorie ou de méthodologie (voir plus loin) peuvent aussi être inclus dans l'introduction, particulièrement en biologie.

But

Le but est une section présente dans les rapports de physique. Le but est généralement court et annonce l'expérience qui sera tentée. Le but peut consister à vérifier une hypothèse, un modèle théorique, une méthode expérimentale ou encore déterminer expérimentalement une constante (Gilles Boisclair et Jocelyne Pagé, 1998, p. 172).

Voici quelques exemples de buts tirés de Gastonguay et coll. (2015, p. 8) :

Séparer, à l'aide d'un montage de distillation fractionnée, un mélange d'hexane et de toluène.

Vérifier, à l'aide d'un chariot et d'un plan incliné, les lois du mouvement rectiligne uniforme de Newton.

Le but peut comporter plusieurs éléments, par exemple :

Analyser le mouvement d'oscillation d'un pendule et s'en servir pour mesurer l'accélération gravitationnelle.

Il peut arriver qu'un rapport de laboratoire de physique nécessite l'écriture d'une introduction plus complète. C'est moins souvent le cas que dans les autres disciplines parce qu'au niveau collégial, les laboratoires de physique servent davantage à confirmer des résultats déjà connus qu'à vérifier d'authentiques hypothèses scientifiques.

Théorie

La théorie sert à présenter et à expliquer les notions théoriques essentielles à la compréhension de l'expérience et du rapport de laboratoire dans son ensemble. Ces notions théoriques peuvent être des conclusions tirées d'études ou de rapports antérieurs, des lois scientifiques, des théorèmes, des équations ou des schémas théoriques (pas expérimentaux). Les informations présentées doivent être référencées et liées aux hypothèses à vérifier ou aux buts à atteindre. Si des équations sont présentes, les variables qui les composent doivent être présentées. Les éléments de la théorie peuvent parfois être inclus dans l'introduction (vérifiez auprès de vos enseignants). Enfin, la section théorie est parfois appelée « cadre théorique » et est parfois réunie avec la section suivante, la méthodologie, pour former le « cadre théorique et méthodologique ».

Méthodologie

La méthodologie doit expliquer comment les buts ou les hypothèses ont été atteints ou vérifiés. La méthodologie doit présenter et expliquer la démarche expérimentale choisie. Selon les situations, la méthodologie inclura les variables mesurées, les étapes expérimentales effectuées, les méthodes d'échantillonnage utilisées ou l'analyse statistique effectuée. La méthodologie peut faire des liens avec la théorie et comporter des schémas. Attention, la méthodologie n'est pas une énumération des manipulations, qui doivent, quant à elles, être présentées dans la section « Manipulations » (voir plus loin). Enfin, la section méthodologie est parfois appelée « cadre méthodologique » et est parfois réunie avec la section précédente, la théorie, pour former le « cadre théorique et méthodologique ».

Matériel

La section sur le matériel présente les instruments et les produits utilisés lors de l'expérience. Les instruments doivent être accompagnés de leur précision et les solutions de leurs concentrations (Boisclair et Pagé, 1998, p. 173). Dans certains contextes, la liste du matériel utilisé peut être reportée en annexe. Enfin, le matériel est parfois présenté avec les manipulations dans une section commune.

Manipulations

La section sur les manipulations présente le détail des opérations effectuées en laboratoire (Boisclair et Pagé, 1998, p. 174). Ces opérations sont généralement présentées dans un style télégraphique, étape par étape. Les manipulations doivent être suffisamment claires et précises pour rendre la démarche expérimentale reproductible. Dans le contexte académique, les manipulations sont rarement demandées parce qu'elles sont déjà incluses dans les protocoles. Dans certains contextes, les manipulations détaillées peuvent aussi être reportées en annexe. Enfin, le matériel et les manipulations sont parfois présentés ensemble dans la même section.

Résultats

La section résultats présente les observations expérimentales, les mesures effectuées et, s'il y a lieu, les quantités calculées à partir des mesures. Afin de rendre les données de l'expérience intelligibles, elles sont généralement présentées sous forme de figures, de tableaux et de graphiques entrecoupés de courtes explications qui aident le lecteur à mieux comprendre la séquence des résultats. Il ne faut toutefois pas commenter les résultats, leur analyse faisant partie de la discussion. La section résultats peut inclure

d'autres éléments comme des analyses statistiques, des calculs d'incertitudes, des comparaisons entre valeurs théoriques et mesurées ou des exemples de calculs (vérifiez auprès de vos enseignants et enseignantes). Pour la manière de présenter les résultats, voir le chapitre 4: Présentation des observations et résultats.

Discussion

La discussion est une section importante du rapport de laboratoire qui consiste en une analyse détaillée des résultats de l'expérience. La discussion comprend généralement un sommaire des principaux résultats obtenus, une critique de la méthode expérimentale et peut introduire de nouvelles pistes de réflexion.

Sommaire des résultats

Le sommaire doit mettre en lumière les principaux résultats expérimentaux et les relier aux principes théoriques, aux hypothèses ou aux buts. La discussion ne doit pas introduire de nouveaux résultats ni se résumer à une énumération de résultats numériques. Selon la situation, les résultats peuvent prendre diverses formes et être notamment des observations qualitatives, des valeurs numériques, des formes de courbes ou des conclusions de tests statistiques. Les résultats devraient être comparés aux attentes (valeurs théoriques, hypothèses, etc.) en tenant compte de leur précision et de leur plausibilité. L'ensemble de l'analyse doit permettre d'apprécier la valeur et la portée des résultats obtenus.

Critique de la méthode expérimentale et causes d'erreur

Les résultats expérimentaux peuvent diverger des attentes ou des hypothèses. Cette partie de la discussion consiste à présenter les facteurs pouvant expliquer ces écarts et analyser leur influence sur la précision et l'exactitude des résultats. Souvent, c'est la méthode expérimentale utilisée qui est responsable des écarts. La négligence volontaire d'un phénomène (ex. : frottement), l'utilisation d'un modèle approximatif (ex. : loi des gaz parfaits) ou la taille réduite des échantillons sont des facteurs explicatifs attribuables à la méthode utilisée. Des causes fortuites peuvent aussi être responsables des écarts observés. Des bris imprévus, les aléas de la nature, la subjectivité de l'observateur sont autant de causes d'erreurs qui peuvent affecter l'exactitude, la précision et ultimement la valeur des résultats obtenus. Attention, les causes d'erreur ne devraient normalement pas inclure des erreurs de lecture, de calcul ou de manipulations. Lorsque de telles erreurs sont commises, on devrait normalement reprendre l'expérimentation. Comme c'est parfois impossible, il peut arriver qu'un ou une enseignante accepte de telles causes d'erreur, mais il est préférable de vérifier auparavant.

Nouvelles pistes de réflexion

Il peut arriver qu'à la suite de l'expérience, des questions demeurent en suspens ou des observations suggèrent de nouvelles questions à explorer. Cette partie de la discussion permet d'évoquer ces questions, de proposer des améliorations à la méthode utilisée ou de suggérer de nouvelles expériences. Il est à noter que cette partie de la discussion peut se retrouver dans la conclusion. Vérifiez auprès de vos enseignants et enseignantes.

Conclusion

La conclusion doit être assez brève et ne comporter aucune nouvelle information. Elle doit rappeler les buts et l'hypothèse et indiquer s'ils ont été atteints et vérifiés ou non. Enfin, la conclusion résume les principaux résultats obtenus et les éléments de la discussion les plus importants à retenir. Enfin, la conclusion peut suggérer de nouvelles pistes de réflexion (voir la section précédente).

Bibliographie

La bibliographie présente les sources utilisées dans le rapport de laboratoire. Ces sources peuvent être liées aux éléments théoriques, à la méthodologie ou à des valeurs théoriques utilisées. Assurez-vous de respecter les normes de présentation du Cahier de méthodologie du Campus des Îles-de-la-Madeleine.

Annexes

Les annexes sont utilisées pour présenter des tableaux de données brutes, des manipulations détaillées ou tout autre élément accessoire dont la taille alourdirait le rapport.

6. Bibliographie

- BARRETTE, C. 2006. *Mystère sans magie – Science, doute et vérité : notre seul espoir pour l’avenir*. Québec. Éditions MultiMondes. 249 pages.
- BOISCLAIR, G., PAGÉ, J. 1998. *Guide des sciences expérimentales : Observations, mesures, rédaction du rapport de laboratoire. 2^e édition*. Saint-Laurent. Éditions du renouveau pédagogique inc. 199 pages.
- BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES. 2008. *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*. 90 pages.
- CÉGEP DE LA GASPÉSIE ET DES ÎLES, CAMPUS DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE. 2022. Sciences de la nature (200.B1). 20 pages.
- CÉGEP DE LA GASPÉSIE ET DES ÎLES, DIRECTION DES ÉTUDES. 2009. *Politique institutionnelle d’évaluation des apprentissages*. 32 pages.
- CENTRE COLLÉGIAL DE DÉVELOPPEMENT DE MATÉRIEL DIDACTIQUE (CCDMD). 2013. *Le rapport de laboratoire*. 36 pages.
- DARWIN, C. 1859. *On the origin of species*. Londres. John Murray. 491 pages.
- FEYERABEND, P. 1979. *Contre la méthode*. Paris. Éditions du Seuil. 350 pages.
- GASTONGUAY, J.-M., GIGUÈRE, G. et LAURIN, G. 2015. *Guide de rédaction des rapports de laboratoire en Sciences de la nature*. Centre d’études collégiales en Charlevoix. 31 pages.
- GÉLINAS, R. s.d. *La vulgarisation scientifique par l’affiche scientifique*. Acquisition des connaissances en culture, rédaction, orthographe et syntaxe (ACCROS). École de technologie supérieure (ÉTS).
https://accros.etsmtl.ca/affiche_scientifique/guide.pdf, consulté le 6 mars 2018.
- GINGRAS, Y., KEATING, P., LIMOGES C. 1998. *Du scribe au savant. Les porteurs du savoir de l’Antiquité à la révolution industrielle*. Montréal. Les Éditions du Boréal. 361 pages.
- LAVOISIER, A. 1789. *Traité élémentaire de chimie*. Paris. Cuchet.
- MARTIN, L. 2012. *Introduction à la microbiologie. 2^e édition*. Saint-Laurent. Éditions du renouveau pédagogique inc. 624 pages.

- MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION ET DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR (MEES). 2016. *Sciences de la nature (200.B0), Programme d'études préuniversitaires*. Québec. 68 pages.
- MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR (MES). 2021. *Sciences de la nature (200.B0), Programme d'études préuniversitaires*. Québec. 83 pages.
- NEWTON, I. 1687. *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Londres. Pepys.
- PORTAIL SANTÉ MIEUX-ÊTRE QUÉBEC. 2017. *Santé et environnement*.
<http://sante.gouv.qc.ca/dossiers/sante-et-environnement/?source=accueil>, consulté le 11 juin 2018.
- ROBERT, P. 1992. *Le Petit Robert : Dictionnaire de la langue française*. Paris. Les Dictionnaires Le Robert. 2171 pages.
- STATISTIQUES CANADA. 2018. *L'espérance de vie des Canadiens de 1920-1922 à 2009-2011*. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/11-630-x/11-630-x2016002-fra.htm>, consulté le 11 juin 2018.
- THOUIN, M. 2001. *Notions de culture scientifique : Concepts de base, percées historiques et conceptions fréquentes*. Québec. Éditions MultiMondes. 418 pages.
- World Wide Fund for Nature (WWF). s.d. *Disparition et dégradation de l'habitat*. <https://wwf.be/fr/defis/disparition-et-degradation-de-lhabitat/>, consulté le 11 juin 2018.