

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France



Volume 4 (2017)



Notes académiques de l'Académie d'Agriculture de France

18, rue de Bellechasse 75007 Paris, France

Tél. : +33 (0)1 47 05 10 37 Fax : +33 (0)1 45 55 09 78

<https://www.academie-agriculture.fr>

Soumission électronique : notes-academiques@academie-agriculture.fr

Rédaction : Académie d'agriculture de France - 18, rue de Bellechasse, 75007 Paris, France

Objet de la revue : Les *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France* sont un journal semestriel d'information et de formation scientifiques, sous la direction du Secrétaire perpétuel de l'Académie d'agriculture de France.

La revue - avec ses éditoriaux, articles originaux, articles d'actualité, notes de conjoncture, publication de fond, revues de la littérature, synthèses, rapports, commentaires critiques d'ouvrage, opinions, textes de conférences, lettres à la rédaction, etc.- donne une information actualisée ayant trait à tous les domaines couverts par les dix sections de l'Académie d'agriculture de France.

Soumissions électroniques : notes-academiques@academie-agriculture.fr

Directeur de la publication : le Secrétaire perpétuel de l'Académie d'agriculture de France

Secrétaires éditoriaux : Yves Brunet, Noëlle Dorion, Hervé This, Nadine Vivier

Comité éditorial : Claude Allo (Secrétaire de section), Bernard Ambolet (Secrétaire de section), Catherine Aubertin (Secrétaire de section), Guilhem Bourrié (Secrétaire de section), Yves Brunet, Noëlle Dorion, Michel Dron (Secrétaire de section), Christian Ferault, André-Jean Guérin (Secrétaire de section), Malcolm Hadley, Bruno Hérault, Philippe Kim-Bonbled, Gilles Lemaire, Nicole Mathieu, Marie-Claude Maurel, Jean-Claude Mounolou, Alain Pavé, Jean-Marie Pierre-Guy, Agnès Ricroch (Secrétaire de section), Bernard Roman-Amat (Secrétaire de section), Jean-Marie Séronie (Secrétaire de section), Hervé This, Sophie Villers (Secrétaire de section), Nadine Vivier.

Informations à l'attention des auteurs : Pour toute question relatives à la soumission des articles , les auteurs peuvent consulter les conseils aux auteurs disponibles à :

<https://www.academie-agriculture.fr/publications/notes-academiques/les-notes-academiques-de-lacademie-dagriculture-de-france-n3af-sont>

ISSN 2966-702X (printed)/ eISSN 2967-2139 (electronic),

DOI : <https://doi.org/10.58630/pubac.not.17611>

Academic Notes of the French Academy of Agriculture

18, rue de Bellechasse 75007 Paris, France

Tel: +33 (0) 1 47 05 10 37 Fax: +33 (0) 1 45 55 09 78

<https://www.academie-agriculture.fr>

Electronic submission: notes-academiques@academie-agriculture.fr

Publication: French Academy of Agriculture - 18, rue de Bellechasse, 75007 Paris, France

Purpose of the review: The *Academic Notes of the French Academy of Agriculture* is a journal of information and scientific training, under the direction of the Permanent Secretary of the Academy of Agriculture of France.

The journal - with its editorials, original articles, news articles, business reports, background publications, literature reviews, summaries, reports, critical reviews, opinions, conference texts, letters to the editor, etc. - gives an updated information relating to all the fields covered by the ten sections of the French Academy of Agriculture.

Electronic Submissions: notes-academiques@academie-agriculture.fr

Director of the publication: Perpetual Secretary of the French Academy of Agriculture

Associate Editors: Yves Brunet, Noëlle Dorion, Hervé This, Nadine Vivier

Editorial Committee: Claude Allo (Secrétaire de section), Bernard Ambolet (Secrétaire de section), Catherine Aubertin (Secrétaire de section), Guilhem Bourrié (Secrétaire de section), Yves Brunet, Noëlle Dorion, Michel Dron (Secrétaire de section), Christian Ferault, André-Jean Guérin (Secrétaire de section), Malcolm Hadley, Bruno Héroult, Philippe Kim-Bonbled, Gilles Lemaire, Nicole Mathieu, Marie-Claude Maurel, Jean-Claude Mounolou, Alain Pavé, Jean-Marie Pierre-Guy, Agnès Ricroch (Secrétaire de section), Bernard Roman-Amat (Secrétaire de section), Jean-Marie Séronie (Secrétaire de section), Hervé This, Sophie Villers (Secrétaire de section), Nadine Vivier.

Information for authors: For any questions regarding the submission of manuscripts, authors may consult the advice to authors available at:

<https://www.academie-agriculture.fr/publications/notes-academiques/les-notes-academiques-de-lacademie-dagriculture-de-france-n3af-sont>

ISSN 2966-702X (printed)/ eISSN 2967-2139 (electronic),
DOI : <https://doi.org/10.58630/pubac.not.17611>

Notes académiques de l'Académie d'Agriculture de France

Académie d'agriculture de France

Volume 4, 2017

DOI : <https://doi.org/10.58630/pubac.not.17611>

- **François Lefevre**. 2017. Apports des sciences de la vie pour comprendre et raisonner les agrosystèmes : exemple de la génétique pour les forêts / Contributions of life sciences to understand and reason agrosystems., 4(1), 1-19, <https://doi.org/10.58630/pubac.not.a196614>
- **Hervé This**. 2017. DSR: frameworks guiding experimental work in science, 4(2), 1-14, <https://doi.org/10.58630/pubac.not.a150459>
- **Hervé This**, Matériel supplémentaire à la note 4(2) : 4(3), 1-38, <https://doi.org/10.58630/pubac.not.a150459>.

Apports des sciences de la vie pour comprendre et raisonner les agrosystèmes : exemple de la génétique pour les forêts

François Lefèvre ¹

¹ Unité de Recherche Ecologie des Forêts Méditerranéennes URFM, INRA, Domaine Saint Paul, AgroParc, 84914 Avignon Cedex 9, France.

Correspondance :
francois.lefevre.2@inra.fr

Résumé

Cette note, rédigée à l'occasion du colloque intitulé *La variation pour comprendre la permanence de la vie*, qui célébrait le vingtième anniversaire de la section 6 (Sciences de la vie) de l'Académie d'Agriculture de France, s'intéresse aux liens entre la connaissance fine de ces disciplines et la compréhension globale des agrosystèmes, en s'appuyant sur des illustrations issues de la génétique et des forêts. Les avancées de connaissance se mesurent dans trois directions que sont l'approfondissement, l'intégration et la transposition, chacune posant des défis particuliers aux sciences de la vie. Pour les arbres forestiers, l'analyse de la structuration de la diversité génétique et des processus de son évolution révèle deux composantes : une part de variation d'héritage ancien, voire très ancien, à forte inertie, et une part de variation labile, continuellement remodelée par les forces évolutives. C'est cette part labile de la variation génétique qui a joué et qui jouera un rôle majeur pour l'adaptation des forêts dans

un contexte de changement rapide et d'incertitudes. Cela nous conduit à privilégier une approche dynamique de la variation : plus que la variation instantanée, ce sont les processus de son évolution qu'il faut identifier, comprendre et exploiter. L'approche dynamique de la variation génétique trouve ainsi des applications directes en sylviculture, dans les programmes de sélection et de conservation des ressources génétiques. Pour conclure, l'accent est mis sur quelques défis que posent, d'une part, la synthèse de la connaissance au sein de la discipline et, d'autre part, l'intégration de la génétique dans un cadre transdisciplinaire de réflexion pour l'action.

Abstract

This note aims to investigate the links between fine knowledge in life sciences and global understanding of complex agrosystems, based on illustrations taken from forest genetics. Three directions of scientific progress are identified, in-

depth studies, integration and transposition, which raise specific challenges for life sciences. The analysis of the structure of genetic diversity in trees reveals two components of variation: one part of the variation is an old heritage (from the phylogeny or from more recent history, e.g. post-glacial recolonization), with high inertia, while the other part of variation is labile, permanently fashioned by local evolutionary processes. This labile part of the variation has played and will play a major role for forest adaptation in the context of change and uncertainties. Therefore, a dynamic approach of variation is favored: more than the instant variation, the processes of its evolution should be identified, understood and used. The dynamic approach of variation can be used in silviculture, breeding and conservation programs. To conclude, challenges for knowledge synthesis within the discipline and challenges for the integration within a transdisciplinary framework for action are briefly discussed.

Keywords

agrosystem, forest, life sciences, genetics, tree

Mots clés

agrosystème, forêt, sciences de la vie, génétique, arbre

Introduction

Comment les progrès des sciences de la vie aident-ils à comprendre et raisonner le fonctionnement global des agrosystèmes ? L'approfondissement de la connaissance ne fait-il qu'ouvrir de nouveaux champs de complexité et de nouveaux domaines d'incertitude ? Comment les savoirs des sciences de la vie peuvent-ils être mobilisés par les différents acteurs pour raisonner leurs décisions ou, plus largement, comment la connaissance en sciences de la vie peut-elle influencer les cadres de décisions eux-mêmes ? Même si les réponses ne sont sans doute pas

simples, ces questions sont importantes. Cette note a pour seule ambition d'apporter quelques éclairages sur les apports d'une discipline des sciences de la vie, la génétique, pour la connaissance et la gestion raisonnée d'un type particulier d'agrosystèmes, les forêts.

Lescourret *et al.* (2015) proposent un cadre d'analyse des agrosystèmes où l'écosystème et le socio-système sont en interaction dynamique, caractérisés chacun par leurs structures et leurs processus respectifs. Les acteurs, par l'impact de leurs actions sur la biodiversité, influencent les processus écologiques. En retour, le fonctionnement des écosystèmes, à travers l'évaluation qui en est faite sous forme de services écosystémiques divers, influence les décisions des différents acteurs.

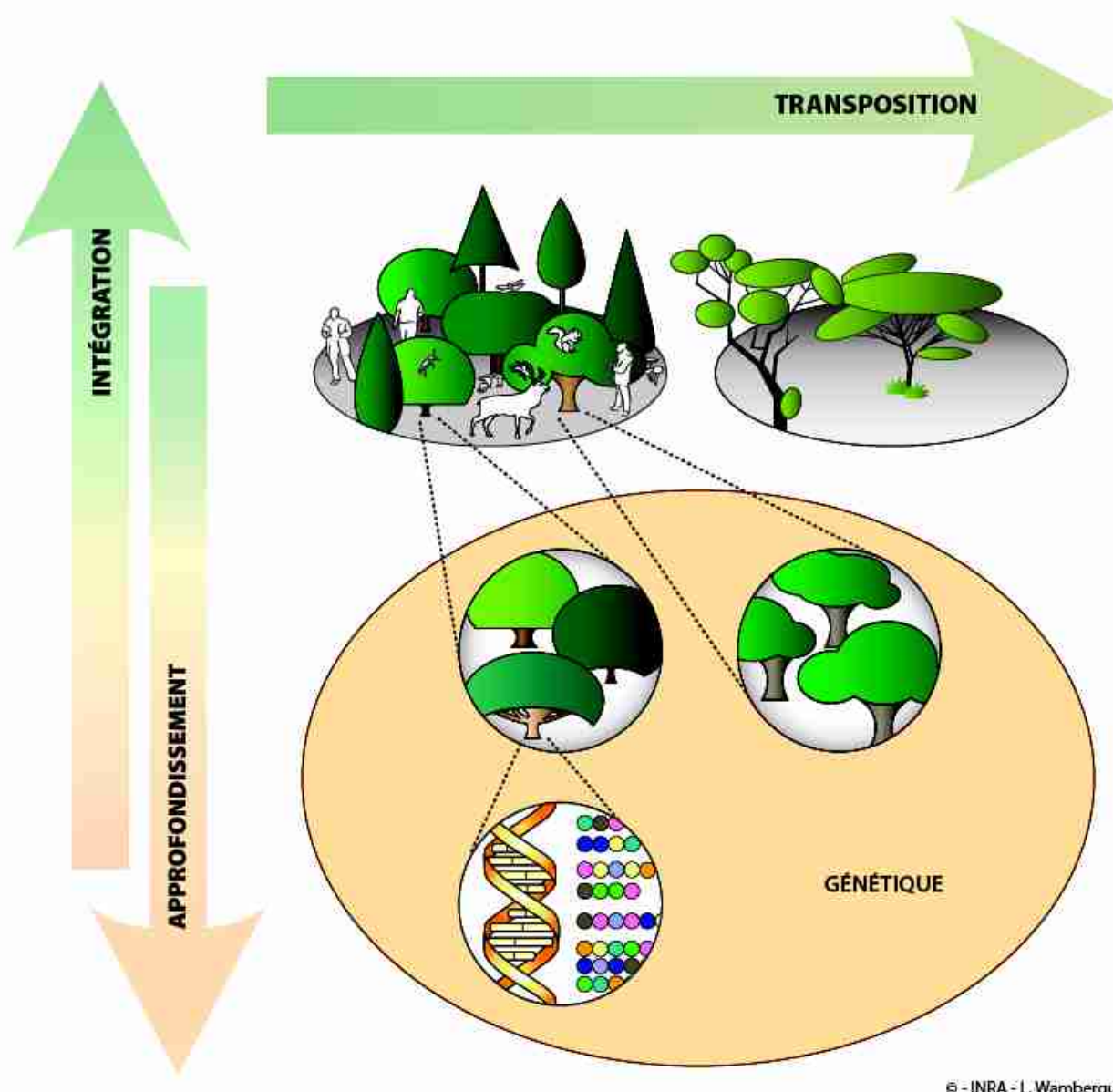
Les forêts sont des agrosystèmes particulièrement complexes et diversifiés, tant du point de vue de leur biodiversité, depuis des forêts tropicales composées d'un grand nombre d'espèces jusqu'à des forêts boréales ou tempérées quasi-monospécifiques, que du point de vue des impacts humains sur leur dynamique, depuis des forêts primaires jusqu'à des plantations en gestion intensive ou des systèmes agroforestiers. Ces deux axes de diversité, biodiversité spécifique et intensité des impacts humains, ne sont d'ailleurs pas systématiquement corrélés. Face aux défis de la complexité et de la diversité des forêts, des avancées de connaissance en sciences de la vie sont attendues dans trois directions (figure 1) : (i) l'approfondissement, qui consiste à élucider de plus en plus finement les mécanismes élémentaires qui déterminent les structures et les processus de la diversité biologique, (ii) l'intégration, qui vise à résoudre la complexité et les nouvelles incertitudes révélées par la connaissance approfondie, et enfin (iii) la transposition, qui vise à généraliser et à sortir de leur contingence les savoirs situés.

Pour comprendre et raisonner les trajectoires d'un agrosystème complexe, il est nécessaire d'intégrer la connaissance au niveau le plus global mais, plus on entre dans la connaissance des mécanismes fins, plus le travail d'intégration est difficile et relève d'un travail de recherche en

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Acte de colloque

soi. Du fait de la diversité des agrosystèmes forestiers, la transposition est fondamentale et peut également poser des questions de méthode. Du fait que le temps de l'expérimentation forestière et le temps de l'impact des pratiques s'inscrivent dans le temps des changements eux-mêmes (en vingt ans, durée de certaines expérimentations ou d'un aménagement forestier,

des changements climatiques sont attendus), la connaissance des sciences de la vie doit progresser simultanément, de manière interactive, et non séquentiellement, dans les trois directions : intégration et transposition doivent être contemporaines de l'approfondissement. Les progrès des sciences de la vie s'appuient



© - INRA - L. Wambergue

Figure 1: Les trois directions d'avancée de la connaissance auxquelles la génétique doit contribuer pour les forêts. L'intégration et la transposition s'appuient souvent sur des interdisciplinarités.

sur cinq modes d'innovations pour la science. Un premier mode d'innovation se situe au niveau du formalisme théorique : on peut citer l'exemple de l'intégration de la plasticité phénotypique dans les modèles de réponse à la sélection qui change le regard sur les processus d'adaptation, notamment chez les arbres (Chevin *et al.*, 2013).

Les technologies ont été un deuxième mode d'innovation particulièrement fécond pour la génétique au cours des dernières années. Ainsi les nouveaux outils de la biologie moléculaire ont non seulement permis de faire converger les approches de la génétique des populations et de la génétique quantitative (Nelson *et al.*, 2013) mais elles ont aussi ouvert la voie à de nouvelles approches dites « omiques », qui intègrent les mécanismes biologiques fins à l'échelle du génome entier. Par ailleurs, l'essor des nouvelles techniques de séquençage à haut débit a ouvert la voie à de nouvelles méthodes d'étude directe d'espèces dites « non-modèles » en s'affranchissant du préalable de création de ressources biologiques intermédiaires, particulièrement laborieux pour les arbres, ce qui facilite les démarches de transposition (Chen *et al.*, 2013).

Un troisième mode d'innovation se situe au niveau des mathématiques appliquées et des outils d'analyse qui accompagnent ces nouvelles techniques et permettent de traiter de très grands jeux de données, par exemple en bio-informatique, ou au niveau des méthodes bayésiennes qui permettent de mieux valoriser l'information portée par les marqueurs génétiques et de mieux prendre en compte l'incertitude par la mise à jour de la connaissance *a priori* dans les analyses.

Le quatrième mode d'innovation se situe au niveau des interdisciplinarités : regards couplés de différentes disciplines des sciences de la vie, par exemple regard évolutionniste de la génétique et regard fonctionnel de l'écophysiologie sur l'adaptation, ou interface entre disciplines des sciences de la vie et d'autres disciplines.

Enfin le cinquième mode d'innovation se situe au niveau des stratégies de mise en application de la connaissance scientifique, que ce soit dans le cadre de sciences intégratives où interagissent

des disciplines opérant à différentes échelles, ou dans le cadre de sciences pour la décision.

La modélisation et les outils de simulation viennent en appui de ces différents modes d'innovation, que ce soit pour la compréhension de phénomènes complexes ou pour le couplage de processus opérant à différentes échelles ; ce sont notamment des outils utiles pour les approches interdisciplinaires.

Il serait illusoire de prétendre à un inventaire exhaustif des avancées de la génétique sur les arbres forestiers au cours des 20 dernières années (pour une synthèse récente, voir Plomion *et al.*, 2016). Le point de vue développé ici est autre : après un bref rappel des spécificités du contexte forestier pour les sciences de la vie, je tâche d'illustrer, par quelques exemples choisis, la diversité des domaines de progrès de la génétique sur les arbres en soulignant quels ont été les modes d'innovation déterminants, d'une part, et quelles en sont les applications les plus directes, d'autre part, avant de conclure sur quelques défis à relever.

Le choix des illustrations est éminemment subjectif et, en particulier, les nouveaux savoirs dont le lien avec la compréhension globale ou la gestion des forêts n'est pas évident, et reste à construire, ne sont pas abordés. Chacune des illustrations est ici très sommairement esquissée, beaucoup des références citées étant elles-mêmes des synthèses qui renvoient à une littérature plus abondante sur chacun des sujets. L'exposé ne suit pas la chronologie des progrès scientifiques.

Bien évidemment, la génétique ne s'intéresse pas qu'aux arbres dans la forêt. L'écologie forestière est avant tout une histoire d'interactions et d'interdépendances entre les arbres, éléments structurants de l'écosystème et parfois objets de gestion, et d'autres organismes (végétaux, animaux, micro-organismes). En particulier, les micro-organismes, qu'ils soient symbiotes ou parasites, et les insectes se caractérisent par une très grande biodiversité et des rôles fonctionnels majeurs. La génétique nous apprend aussi beaucoup sur ces organismes mais cela ne sera pas abordé ici,

faute de place. Notons que la variation génétique des arbres a des effets directs sur la biodiversité qui les environne, c'est la notion de génétique des communautés, ainsi que sur le fonctionnement global de l'écosystème, c'est la notion de phénotype étendu (Whitham *et al.*, 2006 ; Gugerli *et al.*, 2013). Il serait intéressant d'avoir un regard croisé sur les forêts vues à travers ces autres organismes.

Le contexte forestier : des enjeux spécifiques pour les sciences de la vie

Les essences forestières, globalement très nombreuses, sont rarement domestiquées au sens d'une modification transmissible des populations par ou pour l'exploitation humaine et, dans ces quelques cas, la domestication est récente en nombre de générations d'arbres. Le premier rapport sur l'état du monde des ressources génétiques forestières (FAO, 2014) recense 7905 espèces d'arbres dont 2360 sont déclarées comme faisant l'objet d'une « gestion active », c'est-à-dire gérées spécifiquement pour différents biens et services. La gestion, qu'il s'agisse de sylviculture ou d'amélioration génétique, se concentre donc sur un nombre réduit d'espèces. Cela reflète plus les limites de nos capacités de « gestion active » que l'intérêt économique individuel des essences.

Au niveau de la diversité intra-spécifique, la moitié des espèces forestières mondiales sont déclarées victimes ou menacées d'érosion génétique. Dans sa contribution au rapport FAO, la France identifie 3528 espèces forestières natives sur l'ensemble de ses territoires, mais seulement 137 sur le territoire de la métropole. Sur le territoire métropolitain, les forêts sont gérées en régénération naturelle ou en plantation ; cinq espèces, dont deux exotiques, représentent plus de 70 % du commerce de plants pour des plantations forestières (statistiques annuelles sur les ventes de graines et plants forestiers du Ministère de l'agriculture) et seules cinq espèces font l'objet de schémas d'amélioration avancés multi-générationnels au plan national (pin maritime, peuplier, douglas, mélèze, eucalyptus).

L'ampleur de cette diversité d'objets d'études est un premier défi pour les recherches en sciences de la vie. Pour la génétique, le deuxième défi est inhérent à la biologie des arbres, à leur durée de vie et à leur temps de génération (comparativement à la durée d'une carrière de chercheur), aux surfaces et au temps nécessaires pour des expérimentations *in vivo*. Un facteur de complexité supplémentaire vient de la spécificité du méga-génome des conifères (tableau 1). Pour relever ces défis, Neale et Kremer (2011) considèrent que la recherche mondiale en génomique forestière repose sur quelques centaines de chercheurs travaillant sur quelques dizaines d'espèces : rien à voir donc avec l'importance de la communauté scientifique publique et privée concentrée sur un petit nombre de plantes de grandes cultures ou d'animaux d'élevage.

Pour la gestion des forêts, le contexte de changement climatique requiert de changer de paradigme (Legay *et al.*, 2015) ; en effet, les principes fondateurs de la sylviculture reposent sur des hypothèses d'invariance temporelle du milieu. Si les forêts offrent des perspectives

Tableau 1. Taille du génome de quelques essences forestières comparée à celle du génome d'*Arabidopsis* et de quelques plantes cultivées (d'après Neale et Kremer, 2011).

Arabette	0,12 Gb
Riz	0,4 Gb
Peuplier	0,48 Gb
Tomate	1 Gb
Eucalyptus	1,13 Gb
Chêne	1,14-2 Gb
Maïs	5 Gb
Blé tendre	17 Gb
Pin	21-37 Gb
Epicéa	31-40 Gb
Sapin de Douglas	37 Gb

intéressantes pour la réponse de nos sociétés au changement climatique, par leurs fonctions potentielles de stockage et de séquestration du carbone en forêt ou dans les produits à base de bois, de substitution à d'autres matériaux ou énergies fossiles, leur rôle à ce niveau nécessite qu'elles aient elles-mêmes une capacité suffisante d'adaptation à ce changement.

Pour assurer le bon fonctionnement des forêts dans la durée, le changement climatique ne doit pas seulement être raisonné comme un changement d'état, mais comme un état de changement, continu, à considérer d'un point de vue dynamique en tenant compte de toutes les incertitudes qui lui sont liées. Le nouveau paradigme de la gestion adaptative est fondé sur les notions d'apprentissage et de ré-ajustement continus des objectifs et des pratiques (Cordonnier et Gosselin, 2009). On comprend alors que la variation biologique est une ressource pour l'adaptation des forêts et qu'il faut préserver cette ressource sur le long terme pour la gestion des incertitudes (Lefèvre, 2012).

Regard de la génétique sur les arbres forestiers : une variation structurée, plusieurs dynamiques

Il est connu depuis plus de 20 ans que les arbres présentent en général une diversité génétique importante avec une diversité intra-population plus grande et une différenciation inter-population plus faible que les autres organismes, en moyenne (tableau 2). Il existe de rares exceptions, comme le pin pignon (*Pinus pinea*), dont l'absence singulière de polymorphisme génétique pourrait s'expliquer par des impacts anthropiques anciens (Vendramin *et al.*, 2008). Les nouvelles technologies d'analyse du polymorphisme de l'ADN ont confirmé ce constat général (Prat *et al.*, 2006 ; Porth et El-Kassaby, 2014), mais la connaissance a beaucoup progressé sur l'origine et l'organisation de cette diversité ainsi que sur les processus de son évolution.

La variation inter-spécifique des capacités adaptatives montre une double structuration : par

Tableau 2. Synthèse des valeurs de diversité génétique intra-population (H_s) et de différenciation inter-populations (G_{st}) mesurées sur marqueurs isoenzymatiques chez diverses catégories de végétaux (d'après Hamrick et Godt, 1996).

	Espèces	H_s	G_{st}
Espèces végétales	669	0,224	0,228
Annuelles	226	0,196	0,335
Herbacées pérennes	30	0,228	0,278
Ligneux longévifs	196	0,253	0,084

biome et par clade phylogénétique. Ainsi Maherali *et al.* (2004) ont étudié la variation de résistance du xylème à l'embolie : les espèces forestières des zones arides et méditerranéennes sont en moyenne plus résistantes que les espèces des autres biomes forestiers, avec néanmoins une très grande diversité entre espèces au sein de chaque biome. Par ailleurs, au sein de l'embranchement des conifères, les espèces de la famille des *Cupressaceae* se distinguent par une meilleure résistance à l'embolie du xylème probablement héritée d'un ancêtre commun. Les outils de la cladistique permettent d'inscrire la variation des caractéristiques fonctionnelles dans l'arbre phylogénétique des espèces. Au-delà des caractères fonctionnels pris individuellement, ce sont aussi des corrélations entre fonctions physiologiques qui peuvent être héritées de la phylogénie comme cela a été montré dans la famille des *Pinaceae* (Grivet *et al.*, 2013), cette dernière étude montrant également comment les signatures génomiques d'une sélection de certains gènes s'inscrivent parfois dans la phylogénie. La part de la variation qui résulte d'un héritage phylogénique ancien, et qu'on peut donc penser moins flexible à court terme, commence à être mieux caractérisée.

Au sein de chaque espèce, une part de la

variation génétique entre populations est également héritée de processus passés. La combinaison de développements technologiques (séquençage du génome chloroplastique, à hérédité maternelle chez les angiospermes) et de considérations théoriques de génétique des populations (la taille efficace des populations est plus faible sur les génomes cytoplasmiques à hérédité uni-parentale et les flux de gènes sont plus limités par voie maternelle) a permis de mettre au jour l'impact très fort de l'histoire récente (quelques dizaines de générations d'arbres) des recolonisations post-glaciaires sur l'organisation de la diversité génétique intra-spécifique actuelle qui garde des traces de la variation initiale entre refuges glaciaires (Petit *et al.*, 2003). Ce niveau de structuration de la diversité est maintenant très bien documenté sur de nombreuses espèces sur tous les continents et classiquement utilisé dans les stratégies d'exploration, de conservation ou d'exploitation de la diversité (Fady, 2012).

Malgré les héritages de la phylogénie et des processus de recolonisation qui structurent en partie la diversité génétique, la variation adaptative des populations d'arbres forestiers est aussi structurée selon les divers environnements locaux actuels de leurs aires reconquises (Savolainen *et al.*, 2007). L'analyse fine de l'adaptation locale entre populations d'arbres a bénéficié du vaste réseau expérimental de plantations comparatives installées au cours des décennies précédentes (Rehfeldt *et al.*, 2001).

Ce réseau a permis d'aborder conjointement adaptation locale et plasticité phénotypique, désormais considérées comme des caractéristiques indissociables (Aitken *et al.*, 2008). Wang *et al.* (2010) ont proposé un modèle simple, appelé *universal response function*, pour représenter cette dualité et guider le choix de provenances à utiliser en plantation : la performance attendue d'une provenance est prédite simultanément par le climat de son aire d'origine (adaptation locale présumée) et par le climat de son aire d'utilisation (plasticité phénotypique). La calibration d'un tel modèle nécessite d'importants jeux de données issus des plantations comparatives, qui n'existent que pour

quelques espèces, comme le Pin contorta, et ne couvrent qu'une gamme restreinte d'environnements actuels en comparaison aux climats futurs.

Cependant, si les populations forestières sont globalement adaptées à leur environnement local actuel ce n'est pas vrai partout : en particulier, les populations situées aux marges de l'aire de répartition des espèces sont en décalage adaptatif avec leur environnement local, autrement dit les conditions locales ne sont pas celles qui leur confèrent des performances optimales (Savolainen *et al.*, 2007).

Un autre enseignement est que, souvent, les populations les moins sensibles à une contrainte de disponibilité de ressource (eau, température) sont aussi les moins capables de valoriser l'abondance de cette ressource : cet antagonisme peut avoir des conséquences pratiques lorsqu'il s'agit de faire des compromis entre performance et rusticité lors du choix de matériel génétique pour des plantations.

Des patrons d'adaptation locale sont également mis en évidence à l'échelle micro-géographique : au sein de forêts aux conditions environnementales très hétérogènes, le filtre de la sélection naturelle peut être tel que les arbres en place montrent des adaptations génétiques à leur milieu spécifique malgré les flux de gènes intenses à cette échelle (Scotti *et al.*, 2016).

Il est intéressant de noter que la divergence entre populations est beaucoup plus marquée sur des caractères intégrés, comme croissance ou la résistance au froid, que sur les fonctions physiologiques élémentaires qui contribuent à ces caractères pour lesquelles il reste une très grande variation intra-population, potentiel d'évolutions futures (Alberto *et al.*, 2013).

Les espèces forestières ont donc une grande diversité génétique qui détermine en partie leur évolutivité. Façonnée par les processus évolutifs, cette diversité se compose d'une part de variation d'héritage ancien, à forte inertie, avec une part de variation très labile, en perpétuelle construction dynamique, maintenue par un régime de reproduction généralement allogame et de grandes tailles de populations.

Acte de colloque

C'est cette part labile de la variation qui a joué, et jouera, un rôle déterminant pour l'adaptation des forêts dans le contexte de changement.

On comprend ainsi l'importance d'une approche dynamique de la variation pour comprendre et raisonner les systèmes forestiers : ce n'est pas la variation instantanée mais les processus de ses dynamiques, enchaînements de mécanismes aléatoires et sélectifs, qu'il faut identifier, comprendre, exploiter.

Comprendre les processus des dynamiques de la diversité des arbres forestiers

On peut considérer que cinq familles de processus élémentaires façonnent la diversité génétique : la mutation, la dérive génétique, la dispersion, la sélection, les mécanismes épigénétiques. On a peu de connaissances sur le taux de mutation chez les arbres ni sur son éventuel impact sur l'évolution à court terme des peuplements, vraisemblablement très limité. En revanche, les 20 dernières années nous ont beaucoup appris sur les quatre autres processus qui permettent d'expliquer l'organisation actuelle de la variation et d'élaborer des scénarios de trajectoire future.

Hampe et Petit (2005) ont fait une analyse conceptuelle des spécificités des dynamiques évolutives chez les arbres, soulignant que la structuration de la diversité et l'importance relative des différents processus évolutifs varient spatialement à l'échelle de l'aire des espèces. Ainsi, pour une même espèce, ces auteurs distinguent la mosaïque fragmentée des zones refuges glaciaires initiales, les zones de convergences des voies de recolonisation post-glaciaires et les zones pionnières de colonisation ; ces différentes zones de l'aire de distribution étant actuellement confrontées à divers effets locaux du réchauffement climatique. Malgré le processus de recolonisation post-glaciaire des continents, l'impact de la dérive génétique sur la différenciation génétique nucléaire inter-populations est moins marqué chez les arbres que chez d'autres organismes (tableau 2) : cela s'explique par de grandes tailles de populations,

des flux de gènes importants par graines et surtout par pollen, mais aussi par un cycle de vie à longue phase juvénile qui limite les effets de fondation en front de colonisation (Austerlitz *et al.*, 2000).

Les avancées des méthodes de génotypage, des méthodes de suivi physique des propagules ou des agents de leur dispersion et les outils mathématiques permettant de traiter cette information (Klein et Oddou-Muratorio, 2011) ont montré l'importance des événements rares de dispersion à longue distance dont on sait qu'ils jouent un rôle majeur sur la dynamique de colonisation et sur la structuration de la diversité qui en résulte (tableau 3).

Théoriquement, les flux de gènes peuvent ralentir l'adaptation ou au contraire la favoriser en donnant du carburant au moteur évolutif : chez les arbres, dans le contexte du changement climatique, on s'attend à ce que les effets bénéfiques dominent, sauf aux marges arrières des aires de distribution (Kremer *et al.*, 2012).

On sait depuis longtemps que toutes les espèces n'ont pas nécessairement les mêmes stratégies d'adaptation à leur environnement. Au cours des dernières années, le rapprochement des écophysiologistes et des généticiens, avec leurs points de vue complémentaires sur l'adaptation, a permis de mieux caractériser cette diversité de stratégies adaptatives, non seulement entre espèces, mais aussi entre populations au sein des espèces, voire entre individus au sein des populations, et de commencer à étudier l'effet de la sélection naturelle sur cette variation.

Ainsi l'analyse de populations le long de gradients climatiques altitudinaux a révélé l'existence de deux types de structuration de la diversité adaptative en terme de phénologie : si toutes les espèces ont la même réponse plastique au climat avec un débourrement plus tardif dans les environnements plus froids, certaines, comme le chêne, montrent un gradient génétique similaire (placées dans un même environnement d'observation, les populations venant de climat froid ont un débourrement plus tardif que les populations

Acte de colloque

originaires de climat plus chaud), tandis que d'autres comme le hêtre montrent un gradient génétique inverse (placées dans un même environnement d'observation, les populations de climat plus froid débourent plus tôt) (Vitasse *et al.*, 2009). Cette différence s'explique par des exigences de températures différentes pour la levée de dormance (Delpierre *et al.*, 2016).

Comprendre ces différences permet de mieux anticiper les mécanismes de réponses au changement climatique. Au niveau intra-population, au sein d'une hêtraie du Mont Ventoux en condition marginale pour cette espèce, l'étude des gradients de sélection de caractères écophysiologicals, c'est-à-dire les effets marginaux et les effets d'interaction de ces caractères sur les composantes de la valeur sélective individuelle, révèle la coexistence de différentes stratégies d'adaptation à la sécheresse qui semble résulter d'une sélection corrélée sur différents caractères (Bontemps *et al.*, 2017).

Chez les arbres, l'étude expérimentale de la réponse à la sélection naturelle et la démonstration de la signification adaptative de caractères morpho-physiologiques posent le problème de l'évaluation de la valeur sélective (fitness) des individus : des méthodes ont été développées qui permettent, sous certaines conditions, d'estimer

conjointement la fonction de dispersion et le succès reproducteur réalisé des parents, on peut alors chercher à relier la valeur de différents caractères observés sur ces individus avec leur succès reproducteur (Oddou-Muratorio *et al.*, 2005).

Au niveau du déterminisme génétique, chez les arbres forestiers, la variation des caractères impliqués dans l'adaptation est principalement contrôlée par de nombreux gènes à effets faibles (Alberto *et al.*, 2013). Les caractères sous contrôle oligogénique sont très rares, parfois mentionnés dans le cas d'interactions hôte-parasite (Jorge *et al.*, 2005). Pour des espèces allogames comme les arbres, et pour des caractères multigéniques, la théorie de la génétique quantitative prédit que la sélection affecte fortement les fréquences des combinaisons alléliques des gènes sous sélection avant d'affecter les fréquences des allèles eux-mêmes (Kremer et Le Corre, 2012). Ainsi, la part la plus réactive de la variation génétique serait liée aux déséquilibres de liaisons plutôt qu'aux variations de fréquences alléliques. De ce fait, la différence de patrons de variation des fréquences alléliques entre gènes neutres et gènes impliqués dans le déterminisme de caractères multigéniques sous sélection devient ténue : à l'échelle de quelques

Tableau 3. Distances de dispersion maximale observées chez des arbres ; dispersion potentielle relevée par capture de propagules ou suivi de vecteurs, dispersion de pollen viable, dispersion efficace estimée par assignation de parenté sur un événement de reproduction réussi (d'après Kremer *et al.*, 2012).

Propagule	Vecteur	Dispersion	Maximum	Genre
pollen	vent	potentielle	3000kms	<i>Pinus</i>
pollen	vent	viable	600kms	<i>Pinus</i>
pollen	vent	efficace	100kms	<i>Pinus</i>
pollen	insectes	efficace	165kms	<i>Ficus</i>
graines	chauve-souris	potentielle	20kms	<i>Ficus</i>
graines	oiseaux	potentielle	7kms	<i>Xylopia</i>
graines	éléphants	potentielle	5kms	<i>Tamarindus</i>
graines	poissons	potentielle	5kms	<i>Duroia</i>
graines	vent	efficace	3kms	<i>Fraxinus</i>
graines	vertébrés	efficace	12kms	<i>Sorbus</i>

Acte de colloque

dizaines ou centaines de générations, la sélection affecte peu les fréquences des seconds. L'étude de la diversité neutre nous dit donc aussi quelque chose sur le potentiel adaptatif des populations.

Par ailleurs, au niveau de la variation des caractères écophysologiques, on observe la coexistence de différentes stratégies adaptatives (ou syndromes), tant entre les espèces au sein d'un biome, qu'entre populations au sein d'une espèce, ou entre individus au sein d'une population. On peut donc aussi faire l'hypothèse d'une coexistence de différentes combinaisons génétiques adaptatives.

Ces différentes considérations suggèrent que la contribution de chaque allèle à la valeur adaptative individuelle est une variable, dépendante du fond génétique et du contexte environnemental dans lesquels il s'exprime, ce qui conduit à rester très prudent sur ce que l'on doit attendre des recherches de traces de sélection au niveau des fréquences géniques (Rockman, 2011 ; Fariello *et al.*, 2013). Néanmoins, une étude empirique récente de grande ampleur a révélé que 47 gènes (sur 23000 testés) montraient des traces significatives de sélection convergente entre deux espèces de conifères ayant divergé depuis 140 millions d'années (Yeaman *et al.*, 2016).

Cela montre qu'il existe malgré tout quelques rares polymorphismes ayant un effet adaptatif principal (au sens statistique d'effet principal, hors interactions) dans différents contextes génétiques et environnementaux. Comment se fait-il que de tels gènes soient encore polymorphes : s'agit-il d'un polymorphisme ancien conservé par différents processus ou s'agit-il d'un polymorphisme sans cesse renouvelé par des mutations faiblement délétères sur un gène fondamental ?

Parmi les mécanismes de réponse rapide de la variation au filtre environnemental, il y a la plasticité phénotypique et la réponse à la sélection, il y a aussi les mécanismes épigénétiques. L'existence de mécanismes épigénétiques a été démontrée pour la première fois chez un arbre forestier sur l'épicéa (Jøhnsen *et al.*, 2005). Chez cette espèce, ces mécanismes pourraient être impliqués, avec d'autres, dans un

cas très bien documenté d'évolution génétique (transmissible) rapide, en une seule génération, de la phénologie d'arrêt de la croissance (forme de résistance au froid) après transplantation de populations depuis l'Autriche et l'Allemagne vers la Norvège (Skrøppa *et al.*, 2010).

De la connaissance en génétique à son utilisation directe

Le tableau 4 récapitule ce qu'on peut attendre des progrès de la génétique pour les forêts et ce qu'on ne doit pas en attendre.

Trois domaines d'application directe permettent d'illustrer les attentes qu'on peut avoir pour une gestion adaptative, durable et raisonnée des ressources génétiques.

Le premier domaine d'application est la sylviculture qui consiste à réguler les processus de croissance et de compétition dans les peuplements avec plusieurs objectifs possibles selon les forêts, le plus souvent la production de bois, que ces peuplements soient issus de régénération naturelle ou de plantation. La sylviculture revient, de fait, à une régulation de variables démographiques : nombre d'individus, intensité et durée de la phase de reproduction, qualité phénotypique des reproducteurs, distribution spatiale des individus, âge d'élimination, etc. Or ces variables démographiques déterminent directement ou indirectement les processus d'évolution de la diversité génétique : dérive, sélection, flux de gènes. Ainsi, la connaissance des liens entre variables démographiques et processus évolutifs permet d'explicitier les chemins d'impact génétique des pratiques sylvicoles pour évaluer les pratiques actuelles et, au-delà, pour proposer des pratiques innovantes spécifiquement dédiées à la gestion raisonnée des ressources génétiques (Lefèvre *et al.*, 2014). Les pratiques sylvicoles élémentaires sont en nombre limité mais les itinéraires sylvicoles (combinaisons de pratiques) sont nombreux, les chemins d'impact peuvent être complexes avec de possibles effets antagonistes d'une même pratique ou des interactions entre pratiques : si l'on commence à

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
 Academic Notes from the French Academy of Agriculture
 (N3AF)
 Acte de colloque

© - INRA - L. Wambergue

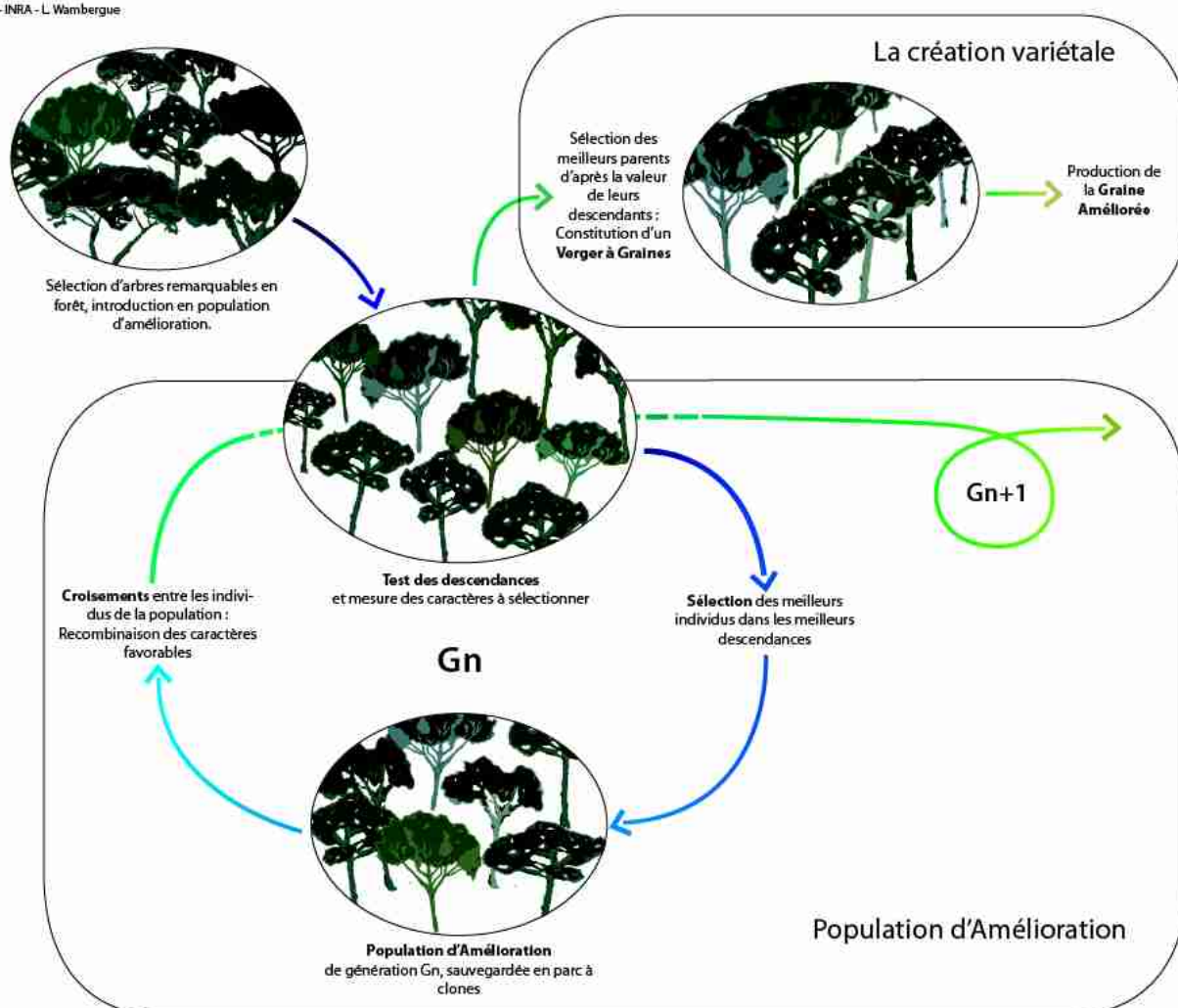


Figure 2: Les différentes phases d'un schéma d'amélioration génétique chez les arbres forestiers (d'après A. Raffin, comm. pers.).

pouvoir raisonner qualitativement les impacts génétiques de la sylviculture, tout reste à faire en terme de quantification de ces impacts.

Le deuxième domaine d'application directe est l'amélioration génétique. Le cas du pin de Monterey (*Pinus radiata*) est une belle illustration du potentiel d'adaptation des espèces forestières : cette espèce, dont l'aire d'origine est réduite à cinq populations côtières et insulaires à l'ouest de la Californie, a pu être adaptée à des conditions environnementales très variées sur l'ensemble des continents par des programmes

d'amélioration génétique locaux en seulement quelques générations (Yan *et al.*, 2006). L'amélioration génétique des arbres est récente et s'appuie encore souvent sur une base génétique diversifiée. Mais les schémas de sélection sont longs et lourds à mettre en œuvre (figure 2).

Plus ils sont avancés plus il devient difficile d'y insérer de nouvelles ressources génétiques sans réduire les perspectives de gain génétique : la spirale domestication – réduction de la base génétique se met progressivement en place. Les

outils et les savoirs de la génétique, notamment dans le secteur de la génomique, permettront d'optimiser et de raccourcir les phases de sélection par une estimation plus rapide et plus précise des paramètres génétiques et des valeurs génétiques, d'aider à l'exploitation des effets non-additifs, à la gestion des corrélations défavorables et à la gestion des interactions Génotype x Environnement, d'intensifier la sélection sur des gènes cibles tout en préservant la diversité non-cible et, plus généralement, de faciliter l'introgession de nouvelles ressources génétiques dans des programmes avancés de sélection (Neale et Kremer, 2011 ; Muranty *et al.*, 2014).

À côté des schémas d'amélioration classiques et de la sélection génomique, une stratégie innovante appelée *breeding without breeding* (BwB) a été proposée spécifiquement pour les arbres par El Kassaby et Lstiburek (2009) et commence à être mise en œuvre sur le douglas (*Pseudotsuga menziesii*) : cela consiste à exploiter la puissance de l'information génomique pour maximiser le gain génétique en s'affranchissant des croisements contrôlés, par estimation des apparentements et reconstitution de pedigrees issus de pollinisation libre, et en limitant au maximum les expérimentations en conditions contrôlées, remplacées par des méthodes d'analyse génétique spatiale *in situ*.

Le troisième domaine d'application mentionné ici est celui des programmes de conservation des ressources génétiques forestières. Diverses stratégies de conservation sont mises en œuvre chez les arbres forestiers, la priorité étant mise autant que possible sur des stratégies de conservation dynamique et en particulier sur la conservation *in situ* où les populations évoluent en continu sous la pression de leur environnement lui-même en changement. La raison de cette priorité devrait être claire maintenant : il s'agit de conserver la dynamique de cette part labile de la variation génétique essentielle pour l'adaptation des forêts. De telles stratégies sont mises en œuvre en France par la Commission des ressources génétiques forestières (CGRF), et en Europe, par le *European Forest Genetic Resources*

Tableau 4. Promesses et non-promesses de la génétique pour une gestion adaptative, durable et raisonnée des ressources génétiques forestières.

Ce qu'on peut attendre des progrès de la génétique :

- des outils et des méthodes pour approfondir l'analyse des variations et co-variations de fonctions biologiques (dans l'espace ou dans le temps, entre individus), ainsi que pour inférer les processus de leur dynamique (hérédité, processus évolutifs) ;
- des techniques et des outils facilitant la transposition de la connaissance sur une biodiversité étendue (par exemple les techniques et les bases de données de biologie moléculaire) ;
- une connaissance approfondie sur les processus évolutifs permettant d'élaborer des scénarios de trajectoire de la diversité (en réponse aux pressions et aux pratiques) pour gérer le changement et ses incertitudes ;
- une connaissance permettant de raisonner la mise en application (aide à la décision, optimisation) et des outils pour la rendre plus efficace (critères et indicateurs).

Ce qu'on ne doit pas en attendre :

- une simplification de la connaissance ;
- une réduction des incertitudes ;
- une libération des préoccupations de long-terme.

Programme EUFORGEN (Lefèvre et Collin, 2013).

La conservation *in situ* s'appuie sur la constitution de réseaux d'unités de conservation, qui sont des forêts dont l'objectif de conservation de ressources génétiques est formalisé et qui remplissent certaines conditions minimales visant à assurer la bonne marche des processus évolutifs (Koskela *et al.*, 2013). Les progrès de la génétique fournissent des outils et méthodes pour optimiser la constitution des réseaux et pour suivre l'efficacité de la conservation. Le

Acte de colloque

réseau européen de conservation *in situ* a été constitué dans une logique de représentativité de la diversité génétique que l'on peut ré-évaluer au fur et à mesure des progrès de connaissance sur la structuration de la diversité (Lefèvre *et al.*, 2012). La robustesse de ce réseau vis-à-vis des perspectives de changement climatique peut également être évaluée par des approches de modélisation (Schueler *et al.*, 2014).

Depuis 1990, la conservation des ressources génétiques est un indicateur de la gestion durable des forêts en Europe (FOREST EUROPE, 2015). La métrique actuellement utilisée pour cet indicateur est uniquement basée sur les surfaces conservées, elle n'informe pas sur la qualité de la conservation. Le réseau EUFORGEN travaille sur une proposition de révision de l'indicateur pour mieux prendre en compte la connaissance sur l'organisation de la diversité et les processus de son évolution : la traduction de la connaissance en outil politiquement opérationnel reste à ce niveau un grand défi.

Conclusion sur quelques défis

Les défis qui se posent à la génétique pour les forêts sont de trois natures différentes : (i) des défis scientifiques propres à la discipline, (ii) des défis d'interaction avec d'autres disciplines, au sein du domaine des sciences de la vie et en dehors, pour analyser et interpréter des données multiples et complexes, développer des approches couplées et intégrer les connaissances et (iii) des défis du passage de la connaissance scientifique à son utilisation.

Malgré la bonne adaptation des espèces à leur environnement local actuel, la variation adaptative subsiste à tous les niveaux d'organisation, jusqu'au niveau intra-population voire intra-individuel, et cette variation contribue au potentiel d'adaptation future des forêts. Un premier défi est d'élucider les causes réelles du maintien de la variation et du potentiel adaptatif sans effet d'érosion lorsqu'une adaptation rapide se met en place. Au moins six hypothèses, non exclusives, peuvent expliquer le maintien de la diversité génétique malgré la sélection : (i) l'hypothèse

quasi-neutraliste, selon laquelle la sélection agirait principalement comme un filtre des combinaisons génotypiques sans trop changer les fréquences alléliques, (ii) l'hypothèse d'équilibre stable, selon laquelle coexisteraient plusieurs optimums adaptatifs, (iii) l'hypothèse d'équilibre dynamique fermé, selon laquelle l'optimum ne serait jamais atteint du fait de contraintes développementales et fonctionnelles conduisant à des fluctuations autour de compromis entre différents caractères antagonistes, (iv) l'hypothèse d'équilibre dynamique ouvert, selon laquelle l'optimum ne serait jamais atteint du fait de flux de gènes récurrents avec d'autres milieux, (v) l'hypothèse de non-équilibre, selon laquelle les changements de pression de sélection maintiendraient la variation dans des états transitoires, (vi) l'hypothèse d'un rôle important de divers mécanismes épigénétiques dans l'adaptation locale, d'ailleurs eux-mêmes potentiellement sous contrôle génétique.

Un second défi pour la génétique est d'évaluer quantitativement le potentiel adaptatif des populations, d'en définir des composantes mesurables et d'en comprendre la dynamique (Pigliucci, 2008). Cette connaissance permettra de mieux comprendre et raisonner les cinétiques de l'adaptation et les limites du potentiel évolutif (Futuyma, 2010 ; Kuparinen *et al.*, 2010).

Les interdisciplinarités sont utiles pour faire avancer la connaissance, notamment dans les directions de l'intégration et de la transposition. Les interactions avec d'autres disciplines des sciences de la vie, interdisciplinarités de proximité, ne sont pas toujours plus simples à mettre en œuvre que des interactions avec d'autres disciplines plus distantes.

Le couplage de différentes approches au sein des sciences de la vie peut devenir lui-même une source d'incertitude. Un exemple en a été donné par la comparaison de différents types de modèles de prédictions de réponse des espèces forestières au changement climatique : selon les espèces les prédictions sont convergentes ou divergentes (Benito-Garzón *et al.*, 2011 ; Cheaib *et al.*, 2012). Il peut aussi y avoir des difficultés sémantiques, par exemple des homonymies.

Acte de colloque

Néanmoins l'intégration de différents processus dans des approches couplées est très prometteuse. Ainsi, en s'appuyant sur un modèle de simulation couplant les processus physiolo-démo-génétiques, Oddou-Muratorio et Davi (2014) ont pu reproduire *in silico* des patrons d'adaptation non linéaires observés sur le terrain le long de gradients altitudinaux. De tels modèles sont utiles pour construire des hypothèses sur les mécanismes d'adaptation, à confronter aux données empiriques ; ils pourront aussi permettre, à terme, de simuler des pratiques sylvicoles pour en tester les impacts.

Intégrer la connaissance à l'échelle de l'agrosystème nécessite des interdisciplinarités distantes entre sciences de la vie, dont la génétique, et d'autres secteurs scientifiques : cela commence à se faire sur les questions de vulnérabilité et de résilience (Williams *et al.*, 2008). Ces interdisciplinarités nécessitent une phase de co-apprentissage plus ou moins lourde selon que les démarches sont différentes ou non (approches quantitatives/qualitatives, méthodes inductives /inférentielles, etc.). Des questions sémantiques peuvent aussi nécessiter clarification. Ainsi Planque *et al.* (2012) font une analyse sémantique intéressante du terme « résilience » et concluent à la nécessité d'une coexistence de définitions floues, utiles pour partager des notions entre disciplines, et de définitions précises et mesurables au sein de chaque discipline. Une autre difficulté à surmonter dans ces interdisciplinarités distantes est de résoudre les hétérogénéités d'échelles spatiales, temporelles et de décision considérées dans chacune des disciplines.

Au niveau du système socio-écologique global, expliciter les chaînes de liens entre les acteurs et les objets biologiques est une difficulté : ces liens sont complexes, leurs sensibilités sont difficilement mesurables. Une attente sur les approches interdisciplinaires est de pouvoir déterminer la prépondérance des différentes pressions (changement climatique, demande sociale et politiques publiques) sur les trajectoires futures des forêts dans leur contexte local

particulier.

Le temps forestier long et la vélocité des changements des pressions sur les forêts nécessitent de raccourcir les délais entre le développement de la connaissance scientifique, dans les trois directions rappelées en introduction, et son application. Après avoir intégré la connaissance académique pluridisciplinaire, le premier défi est la co-construction entre chercheurs et autres acteurs des innovations pour l'action. L'innovation pour la science, dont il était question en introduction, n'est pas nécessairement une innovation pertinente pour l'action et d'autres modes d'innovation sont en jeu. Le second défi, pour les décideurs à chaque niveau de décision, est d'intégrer la dynamique des progrès de connaissance dans leurs stratégies adaptatives : il faut sortir du schéma caricatural où les acteurs auraient des questions et les chercheurs tenteraient d'apporter des éléments de réponses, questions et réponses sont également à co-construire en intégrant les connaissances de chacun.

Remerciements

Je tiens à remercier Mathilde Causse, Dominique Job, André Charrier, ainsi que les deux rapporteurs pour leur relecture attentive et leurs commentaires avisés. Merci également à Louise Wambergue pour les réalisations graphiques

Références

Aitken SN, Yeaman S, Holliday JA, Wang TL, Curtis-McLane S. 2008. *Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. Evolutionary Applications*, 1, 95-111.

Alberto F, Aitken S, Alia R, González-Martínez S, Hanninen H, Kremer A, Lefèvre F, Lenormand T, Yeaman S, Whetten R, Savolainen O. 2013. Potential for evolutionary responses to climate change - evidence from

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Acte de colloque

- tree populations. *Global Change Biology*, 19, 1645-1661.
- Austerlitz F, Mariette A, Machon N, Gouyon PH, Godelle B. 2000. Effects of colonization processes on genetic diversity: differences between annual plants and tree species. *Genetics*, 154, 1309-1321.
- Benito Garzón M, Alía R, Robson TM, Zavala MA. 2011. Intra-specific variability and plasticity influence potential tree species distributions under climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 20, 766-778.
- Bontemps A, Davi H, Lefèvre F, Rozenberg P, Oddou-Muratorio S. 2017. How do functional traits syndromes covary with growth and reproductive performance in a water-stressed population of *Fagus sylvatica*? *Oikos*, doi:10.1111/oik.04156 .
- Cheaib A, Badeau V, Boe J, Chuine I, Delire C, Dufrière E, François C, Gritti ES, Legay M, Pagé C, Thuiller W, Viovy N, Leadley P. 2012. Climate change impacts on tree ranges: model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty. *Ecology Letters*, 15, 533-544.
- Chen C, Mitchell SE, Elshire RJ, Buckler ES, El-Kassaby YA. 2013. Mining conifers' mega-genome using rapid and efficient multiplexed high-throughput genotyping-by-sequencing (GBS) SNP discovery platform. *Tree Genetics & Genomes*, 9, 1537-1544.
- Chevin LM, Collins S., Lefèvre F. 2013. Phenotypic plasticity and evolutionary demographic responses to climate change: taking theory out to the field. *Functional Ecology*, 27, 966-979.
- Cordonnier T, Gosselin F. 2009. La gestion forestière adaptative : intégrer l'acquisition de connaissances parmi les objectifs de gestion. *Revue Forestière Française*, LXI(2), 131-144.
- Delpierre N, Vitasse Y, Chuine I, Guillemot J, Bazot S, Rutishauser T, Rathgeber CBK., 2016. Temperate and boreal forest tree phenology: from organ-scale processes to terrestrial ecosystem models. *Annals of Forest Science*, 73, 5-25.
- El-Kassaby YA, Lstibůrek M. 2009. Breeding without breeding. *Genetics Research*, 91, 111-120.
- Fady B. 2012. *Biogeography of neutral genes and recent evolutionary history of pines in the Mediterranean Basin*. *Annals of Forest Science*, 69, 421-428.
- FAO. 2014. *The state of the world's forest genetic resources*. FAO ed, Rome, 277 p.
- Fariello MI, Boitard S, Naya H, SanChristobal M, Servin B. 2013. Detecting signatures of selection through haplotype differentiation among hierarchically structured populations. *Genetics*, 193, 929-941.
- FOREST EUROPE. 2015. *State of Europe's forests*. 314 p.
- Futuyma DJ. 2010. Evolutionary constraint and ecological consequences. *Evolution*, 64, 1865-84.
- Grivet D, Climent J, Zabal-Aguirre M, Neale DB, Vendramin GG, González-Martínez SC. 2013. Adaptive evolution of Mediterranean pines. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 68, 555-566.
- Gugerli F, Brandl R, Castagneyrol B, Franc A, Jactel H, Koelewijn HP, Martin F, Peter M, Pritsch K, Schröder H, Smulders MJM, Kremer A, Ziegenhagen B, Evoltree JERA3 Contributors. 2013. Community genetics in the time of next-generation molecular technologies. *Molecular Ecology*, 22, 3198-3207.
- Hampe A, Petit RJ. 2005. Conserving

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Acte de colloque

- biodiversity under climate change: the rear edge matters. *Ecology Letters*, 8, 461-467.
- Hamrick JL, Godt JW. 1996. Effects of life history traits on genetic diversity in plant species. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 351, 1291-1298.
- Johnsen Ø, Dæhlen OG, Østregg G, Skrøppa T. 2005. Daylength and temperature during seed production interactively affect adaptive performance of *Picea abies* progenies. *New Phytologist*, 168, 589-596.
- Jorge V, Dowkiw A, Faivre-Rampant P, Bastien C. 2005. *Genetic architecture of qualitative and quantitative Melampsora larici-populina leaf rust resistance in hybrid poplar: genetic mapping and QTL detection*. *New Phytologist*, 167, 113-127.
- Klein EK, Oddou-Muratorio S. 2011. Pollen and seed dispersal inferred from seedling genotypes: the Bayesian revolution has passed here too. *Molecular Ecology*, 20, 1077-1079.
- Koskela J, Lefèvre F, Schüler S, Kraigher H, Olrik DC, Hubert J, Longauer R, Bozzano M, Yrjänä L, Alizoti P, Rotach P, Vietto L, Bordács S, Myking T, Eysteinnsson T, Souvannavong O, Fady B, De Cuyper B, Heinze B, von Wühlisch G, Ducouso A, Ditlevsen B. 2013. Translating conservation genetics into management: pan-European minimum requirements for dynamic conservation units of forest tree genetic diversity. *Biological Conservation*, 157, 39-49.
- Kremer A, Le Corre V. 2012. Decoupling of differentiation between traits and their underlying genes in response to divergent selection. *Heredity*, 108, 375-385.
- Kremer AK, Ronce O, Robledo-Arnuncio JJ, Guillaume F, Bohrer G, Nathan R, Bridle JR, Gomulkiewicz R, Klein EK, Ritland K, Kuparinen A, Gerber S, Schueler S. 2012. Long-distance gene flow and adaptation of forest trees to rapid climate change. *Ecology Letters*, 15, 378-392.
- Kuparinen A, Savolainen O, Schurr FM. 2010. Increased mortality can promote evolutionary adaptation of forest trees to climate change. *Forest Ecology and Management*, 259, 1003-1008.
- Lefèvre F. 2012. *Les ressources génétiques, un réservoir pour les services de production et une dynamique pour la gestion des incertitudes*. *Revue Forestière Française*, LXIV(3), 235-242.
- Lefèvre F, Boivin T, Bontemps A, Courbet F, Davi H, Durand-Gillmann M, Fady B, Gauzere J, Gidoïn C, Karam MJ, Lalagüe H, Oddou-Muratorio S, Pichot C. 2014. Considering evolutionary processes in adaptive forestry. *Annals of Forest Science*, 71, 723-739.
- Lefèvre F, Collin E. 2013. Conserver les RGF en France et en Europe : objectifs et méthodes. *Rendez-Vous Techniques ONF*, 36-37, 10-13.
- Lefèvre F, Koskela J, Hubert J, Kraigher H, Longauer R, Olrik DC, Schüler S, Bozzano M, Alizoti P, Bakys R, Baldwin C, Ballian D, Black-Samuelsson S, Bednarova D, Bordács S, Collin E, De Cuyper B, de Vries SMG, Eysteinnsson T, Frýdl J, Haverkamp M, Ivankovic M, Konrad H, Koziol C, Maaten T, Notivol Paino E, Öztürk H, Pandeva ID, Parnuta G, Pilipovič A, Postolache D, Ryan C, Steffenrem A, Varela MC, Vessella F, Volosyanchuk RT, Westergren M, Wolter F, Yrjänä L, Zariņa I. 2012. Dynamic Conservation of forest genetic resources in 33 European countries. *Conservation Biology*, 27, 373-384.
- Legay M, Bastien C, Bastien JC, Bartet X, Davi H, Dhôte JF, Ducouso A, Benito-Garzon M, Caquet T, Dreyfus P, Jambois A, Lefèvre F, Marçais B, Mengin-Lecreux P, Micheneau C, Pinto P, Plomion C, Sardin T. 2015.

Acte de colloque

- Adaptation : vers un enrichissement du dialogue recherche-gestion. *Innovations Agronomiques*, 47, 121-130.
- Lescourret F, Magda D, Richard G, Adam-Blondom AF, Bardy M, Baudry J, Doussan I, Dumont B, Lefèvre F, Litrico I, Martin-Clouaire R, Montuelle B, Pellerin S, Plantagenest M, Tancoigne E, Thomas A, Guyomard H, Soussana JF. 2015. A social-ecological approach to managing multiple agro-ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 68-75.
- Maherali H, Pockman WT, Jackson RB. 2004. Adaptive variation in the vulnerability of woody plants to xylem cavitation. *Ecology*, 85, 2184-2199.
- Muranty H, Jorge V, Bastien C, Lepoittevin C, Bouffier L, Sanchez L. 2014. Potential for marker-assisted selection for forest tree breeding: lessons from 20 years of MAS in crops. *Tree Genetics & Genomes*, 10, 1491-1510.
- Neale DB, Kremer A. 2011. Forest tree genomics: growing resources and applications. *Nature Reviews Genetics*, 12, 111-122.
- Nelson RM, Pettersson ME, Carlborg Ö. 2013. A century after Fisher: time for a new paradigm in quantitative genetics. *Trends in Genetics*, 29, 669-676.
- Oddou-Muratorio S., Davi H. 2014. Simulating local adaptation to climate of forest trees with a Physio-Demo-Genetics model. *Evolutionary Applications*, 7, 453-467.
- Oddou-Muratorio S, Klein EK, Austerlitz F. 2005. Pollen flow in the wildservice tree, *Sorbus torminalis* (L.) Crantz. II. Pollen dispersal and heterogeneity in mating success inferred from parent-offspring analysis. *Molecular Ecology*, 14, 4441-4452.
- Petit RJ, Aguinagalde I, de Beaulieu JL, Bittkau C, Brewer S, Cheddadi R, Ennos R, Fineschi S, Grivet D, Lascoux M, Mohanty A, Müller-Starck G, Demesure-Musch B, Palme A, Martin JP, Rendell S, Vendramin GG. 2003. Glacial refugia: hotspots but not melting pots of genetic diversity. *Science*, 300, 1563-1565.
- Pigliucci M. 2008. Is evolvability evolvable?. *Nature Reviews Genetics*, 9, 75-82.
- Planque B, Certain G, Primocerio R, Michalsen K, Jørgensen LL, Aschan M, Dalpadado P, Skern-Mauritzen M., Johannesen E, Kortsch S, Wiedemann M. 2012. *Ecological resilience for ecologists*. International Council for the Exploration of the Sea ICES/CM 2012, A:20, 13 p.
- Plomion C, Bastien C, Bogeat-Triboulot MB, Bouffier L, Déjardin A, Duplessis S, Fady B, Heuertz M, Le Gac AL, Le Provost G, Legué V, Lelu-Walter MA, Leplé JC, Maury S, Morel A, Oddou-Muratorio S, Pilate G, Sanchez L, Scotti I, Scotti-Saintagne C, Segura V, Trontin JF, Vacher V. 2016. Forest tree genomics: 10 achievements from the past 10 years and future prospects. *Annals of Forest Science*, 73, 77-103.
- Porth I, El-Kassaby Y. 2014. Assessment of the genetic diversity in forest tree populations using molecular markers. *Diversity*, 6, 283-295.
- Prat D, Faivre-Rampant P, Prado E. 2006. *Analyse du génome et gestion des ressources génétiques forestières*. INRA editions, Paris, 456 p.
- Rehfeldt GE, Wykoff WR, Ying CC. 2001. Physiological plasticity, evolution, and impacts of a changing climate on *Pinus contorta*. *Climatic Change*, 50, 355-376.
- Rockman MV. 2011. The QTN program and the alleles that matter for evolution : all that's gold does not glitter. *Evolution*, 66, 1-17.

Savolainen O, Pyhäjärvi T, Knürr T. 2007. Gene flow and local adaptation in trees. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 38, 595–619.

Schueler S, Falk W, Koskela J, Lefèvre F, Bozzano M, Hubert J, Kraigher H, Longauer R, Olrik DC. 2014. *Vulnerability of dynamic genetic conservation units of forest trees in Europe to climate change*. *Global Change Biology*, 20, 1498-1511.

Scotti I, González-Martínez SC, Budde KB, Lalagüe H., 2016. Fifty years of genetic studies: what to make of the large amounts of variation found within populations?, *Annals of Forest Science*, 73, 69-75.

Skrøppa T, Tollefsrud M, Sperisen C, Johnsen Ø. 2010. Rapid change in adaptive performance from one generation to the next in *Picea abies* - Central European trees in a Nordic environment. *Tree Genetics & Genome*, 6, 93–99.

Vendramin GG, Fady B, González-Martinez SC, Hu FS, Scotti I, Sebastiani F, Soto A. Petit RJ. 2008. Genetically depauperate but widespread: the case of an emblematic Mediterranean pine. *Evolution*, 62, 680-688.

Vitasse Y, Delzon S, Bresson CC, Michalet R, Kremer A. 2009. Altitudinal differentiation in growth and phenology among populations of temperate-zone tree species growing in a common garden. *Canadian Journal of Forest Research*, 39, 1259-1269.

Wang T, O'Neill GA, Aitken SN. 2010. Integrating environmental and genetic effects to predict responses of tree populations to climate. *Ecological Applications*, 20, 153-163.

Whitham TG, Bailey JK, Schweitzer JA, Shuster SM, Bangert RK, LeRoy CJ, Lonsdorf EV, Allan GJ, DiFazio SP, Potts BM, Fischer DG, Gehring CA, Lindroth RL, Marks, JC, Hart SC, Winimp GM, Wooley SC. 2006. A

framework for community and ecosystem genetics: from genes to ecosystems. *Nature Reviews Genetics*, 7, 510–523.

Williams SE, Shoo LP, Isaac JL, Hoffmann AA, Langham G. 2008. Towards an integrated framework for assessing the vulnerability of species to climate change. *PLoS Biology*, 6:e325.

Yan H, Bi H, Li R, Eldridge R, Wu Z, Li Y, Simpson J. 2006. Assessing climatic suitability of *Pinus radiata* (D. Don) for summer rainfall environment of southwest China. *Forest Ecology and Management*, 234, 199-208.

Yeaman S, Hodgins KA, Lotterhos KE, Suren H, Nadeau S, Degner JC, Nurkowski KA, Smets P, Wang T, Gray LK, Liepe KJ, Hamann A, Holliday JA, Whitlock MC, Rieseberg LH, Aitken SN. 2016. Convergent local adaptation to climate in distantly related conifers. *Science*, 353, 1431-1433.

Edité par

Yves Birot, membre de l'Académie d'agriculture de France, directeur de recherche honoraire de l'Inra, chef de département honoraire des Recherches forestières de l'Inra.

Rapporteurs

Catherine Bastien est membre de l'Académie d'agriculture de France et directrice de recherche à l'Inra.

Yves Birot est membre de l'Académie d'agriculture de France, , directeur de recherche honoraire de l'Inra, chef de département honoraire des Recherches forestières de l'Inra.

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Acte de colloque

Rubrique

Cet article a été publié dans la rubrique «Actes de colloques» des *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France*.

Reçu

24 juin 2017

Accepté

5 septembre 2017

Publié

30 septembre 2017

Citation

Lefèvre F. 2017. Apports des sciences de la vie pour comprendre et raisonner les agrosystèmes : exemple de la génétique pour les forêts, *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF)*, 2017, 7, 1-19. <https://doi.org/10.58630/pubac.not.a196614>.



François Lefèvre est généticien. Il étudie les processus de "micro-évolution", c'est-à-dire sur des pas de temps courts et à une échelle locale, chez les arbres forestiers. Il est président de la Commission nationale des ressources génétiques forestières (CRGF), directeur de recherche à l'Inra et membre correspondant de la section 6 de l'Académie d'agriculture de France.

DSR: frameworks guiding experimental work in science

Hervé This ^{1,2}

¹ UMR Ingénierie Procédés Aliments, AgroParisTech, Inra, Université Paris-Saclay, 91300 Massy, France

² Groupe de gastronomie moléculaire, Inra-AgroParisTech International Centre for Molecular Gastronomy, F-75005, Paris, France

Correspondance :

herve.this@inrae.fr

Abstract

Scientific activities appear sometimes difficult for science students or young scientists because a large number of tasks have to be performed according to strict rules that are not always known or remembered. Electronic files guiding scientific activity, with a series of detailed steps and providing explanations about why these steps are needed, can be useful guides for scientists. Such documents, called DSR, are open documents that have been improving for years. They are used for improved traceability and quality, without replacing laboratory notebooks.

Résumé

Les étudiants des filières scientifiques et les jeunes scientifiques trouvent souvent l'activité scientifique difficile, notamment parce que le nombre de tâches simultanées ou successives, fondées sur des règles strictes de bonne pratique, est considérable. Des documents électroniques qui guident l'activité de recherche, incluant une série d'étapes détaillées assorties d'explications pour justifier ces étapes, peuvent aider les scientifiques. Ces documents, nommés "documents structurants de recherche", ou

DSR, ont été progressivement mis au point. Ils guident le travail expérimental et théorique et évitent des erreurs, tout en augmentant la qualité et la traçabilité des travaux, sans remplacer toutefois les cahiers de laboratoire.

Keywords

planning, experiment, best practices

Mots clés

planification, pratique scientifique, bonnes pratiques

Introduction

Students in science and young scientists sometimes find the practice of science difficult, because it involves considering a lot of data at the same time, doing many different tasks simultaneously and following strict rules of best practices. Frequently experiments have to be redone not only because it is a "good practice" to find a confirmation, or validation (Fisher, 1937;

Document d'enseignement

Harris, 1998) or because one has to determine the standard-deviation on final results, but also because some data are missing in the first runs, due to insufficient preparation and planning of experiments. The *Journal of Chemical Education* weighed in on the importance of this topic as early as 1933 (MacNeil and Falconer, 2010), but this applies in any scientific field and not only chemistry. It was noted that good note-taking skills in the laboratory are not only essential, but they are required (Sesen and Tarthan, 2010). The issue is often whether scientists write down enough details, but saying the disease is not curing it.

Based on the management of many students (from 14-years old to Ph.D) for decades, we progressively set up electronic files that all newcomers are happy to use in order to make good science, following rules of good practices (This, 2017a). These electronic files are certainly not electronic laboratory notebooks, of which purpose is to ensure the traceability of the origin of a discovery, in particular in case of disputes related to patenting (these are compulsory tools for private and public laboratories, as said below) but they can be included either in traditional or electronic notebooks; they are called for short "DSR" (Documents for structuring research). They contribute to compensate for limits of human memory and attention, helping to ensure consistency and completeness in carrying out scientific tasks.

In practice, they are empty *Maple* (Waterloo Maple Inc, Canada) files containing sections that are to be filled in successively, like detailed checklists, adding explanations for each step to be performed. The choice of the *Maple* software is based on the possibility to mix text, formal calculation, programming as well as numerical calculation.

There is an important difference between DSR and laboratory notebooks. Indeed laboratory notebooks are of compulsory use in private and public laboratories (Caprette, 2017; Ryan, 2017). This is so well known that we give here only one important reason of using laboratory notebooks, *i.e.* being official documents for assessing priority and possibility of patenting (this is why they have

to be signed both by the operator and by a co-worker or supervisor).

DSR are no laboratory notebooks, but a way to help the young scientists to make a structured work, to be sure that their work will allow them to publish their results, to be sure to apply all the good practices rules for scientific activity (Bybee *et al.*, 2008; Score, 2008; Sone, 2014) and avoid forgetting important information. DSR are clearly important educational tools, but they can be helpful even for confirmed scientists, as they remind them of all the various tasks that have to be done during scientific research.

One has also to add that many universities and scientific institutions discuss the way scientific research can be done (Pagé *et al.*, 2014), but they don't deliver frameworks such as DSR. It is even a proposal that DSR could be discussed and possibly modified by the whole scientific community. And if it is true that some electronic laboratory notebooks include some sections, we observe that more details, such as in DSR, could be introduced.

Current DSR have three sections: (1) for the preparation of experiments, (2) for performing them, and (3) for the interpretation of results. For each field of each section, explanations are given in the documents, in order to guide the scientists. The content of the spreadsheet is not particularly novel- it is basic information that any scientist or science instructor knows and is hopefully teaching. However it is a fact that they can avoid mistakes by reminding steps.

Finally one should stress that these DSR are based on various epistemological models, but with a strong Baconian and Popperian direction (Bernard, 1865; Meyerson, 1908; Normandin, 2007; Popper, 1959; Popper, 1972; This, 2009). More precisely, it is assumed (more below) that sciences of nature are advancing through the following steps: (1) identification of a phenomenon; (2) quantitative characterization of this phenomenon; (3) grouping the data into quantitative laws (*i.e.* equations); (4) by induction, looking for a "theory", *i.e.* a group of equations corresponding to "mechanisms"; (5) looking for a prediction based on the proposed theory; (6) testing quantitatively the theoretical

Document d'enseignement

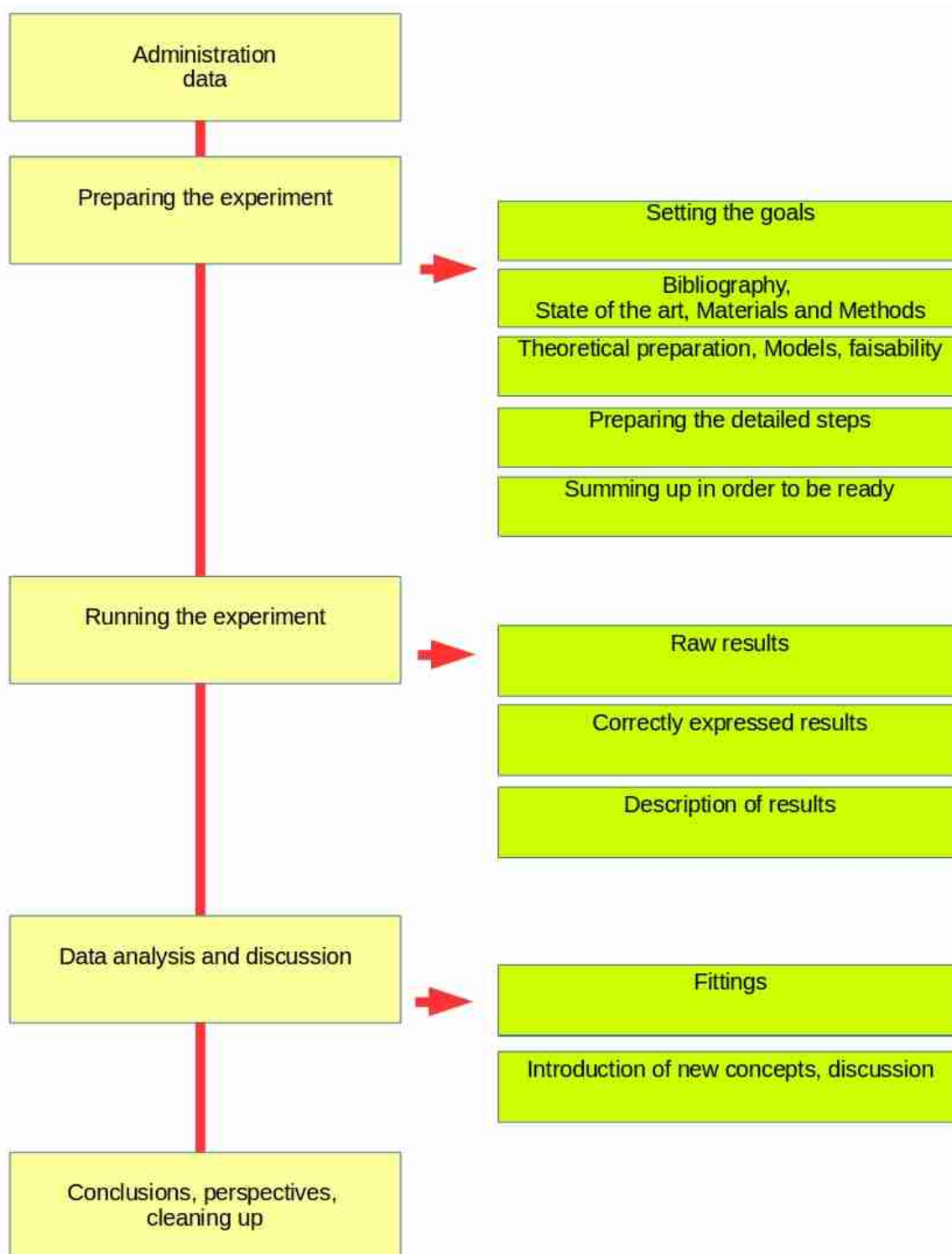


Figure 1. The various parts of DSR documents.

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Document d'enseignement

1. Preparing the experiment

Name of the scientist:

Explanation

Any document should be signed, in particular in this new era of digital exchanges. Do you know the story of Leo Szilard discussing with Hans Bethe: when Bethe was speaking, Szilard was taking notes. Bethe asked him if he was stealing his ideas, and Szilard answered: "No, on the contrary, I note that they come from you".

Date of creation of this file:

Explanation

This indication (as all others) has a reason to be here: in particular, works should be:

- of high quality
- traceable

We shall discuss later the question of quality, but traceable means that one should be able to reproduce all the work, not by fear of fraud (only "small people" have small ideas, individuals of quality have ideas of quality) but in order to understand possible differences with a reproduction of the experiment.

Moreover, indications such as this simple date allow personal evaluation, and we can later calculate how much time was needed to do this work, and to compare with what we guessed to need, in order to improve our estimation skills.

Goals of the work:

Explanation

Any experiment has a goal. Which one do you have with this one?

Here, the question is not to give title (this was already done), by a clear explanation of the goals. Of course, there is a possibility of repetition, but one wants to be perfectly clear.

Be careful that a project is better when it has many goals at the same time. And don't be shy or too concise. Explain, explain, and explain again.

More generally, always try to be twice clearer than you think that you have to be.

The reasons of this experiment:

Explanation

I know too well that many friends confuse the goals and the reasons of the experiment... but you should guess that if there are two different slots, it means that there is a difference, that you have to understand. Here, you are invited to explain:

1. why you do the experiment;
2. why you have the goals that you explained above.

Figure 2. The beginning of the first part of the Maple version of DSR. Each slot contains first an explanation about how it should be filled in. The document is highly structured by the use of "sections" and "sub-sections" (see Supplemental Material : N3AF, 2017, 4(3)).

prediction. Of course, there can be differences depending on various sciences, but DSR can be adapted to the various needs.

The DSR documents can be improved, and they have been indeed changed for years. Various formats of the DSR are given in Supplemental

Material (.mw, .pdf, .html, for example) (This, 2017b).

In this article, a description of the content of DSR is given (italics), with explanations (roman); a flowchart summarizing the main steps of the whole process is shown in figure 1.

Document d'enseignement

First part: planning experiments

Although we don't have figures to demonstrate it, we have been observing in our research group that insufficient planning of experiments is a major cause of failure, and this is why this part became progressively longer with years. It includes information for traceability and quality (Grogan, 2008).

Title of the work: Here DSR users have first to consider the question "What is a title?". It is an important one, as DSR are later used for publication (internship reports, scientific publication).

Of course, some *Guide to Authors* from scientific journals explain how titles should be designed, but this information is needed and helpful well before an article is prepared. Moreover, designing a proper title is also a way to envision more thoroughly the work to be done. And the title of the work is also often a useful basis for discussions between a scientist and his/her mentors or hierarchy.

Name of the scientist: Some fields of DSR documents are useful in view of knowledge production, but others are important for educational reasons. In particular this one is used for making scientists aware of ethics and property (Du and Kofman, 2007). It is also useful in teams in which intellectual exchange is considered as a useful tool for efficiency.

Name of the file: Using codes makes files more easily to be recovered in a research group where results can be discussed in common. Even if DSR are not electronic laboratory notebooks, they can follow the same ISO 17025 rules (Du and Kofman, 2007).

When this file was created: This field will be used as others later in the file for keeping track of the research agenda. Indeed this field was first introduced because it is part of quality process (Chotkowski La Follette, 1982), but also because it gives the possibility, at the "evaluation step" (below), to evaluate the time

that would be needed, so that a better prediction of time needed for the various tasks and a better planning can be made in the future. It can be good training that students use the date format of the international standard ISO 8601 (Kühn, 2017).

Estimation of the time needed for running the experiment: This field is useful both personally and collectively. First it is good in scientific life that one can try to predict how much time will be needed for a particular experiment, because this helps keeping an agenda and planning works. For sure, it can be sometimes difficult to follow an agenda, and a time window can be given instead of a single estimation.

It has to be added that there is no need to stick to this prediction, and research has to be done at its pace. However, in view of future tasks of coordination, management or direction, it is important to know how much time one needs personally, before asking allocating time resources for others.

Goals of the work: For sure, the goal of science is making "discoveries" (Popper, 1959; This, 2009). But if an experiment was decided, it is probably because a particular question was introduced as a step for discovery. In this regard, the title should be "Goal of the work", with no plural, and accordingly, the first goal is the study of this particular question.

This is explained in the "explanation" part of DSR, for this particular entry. However it happens in scientific research that secondary goals have to be used when the primary one could not be reached (FAO, 2017). Also it is good to consider that there can be milestones, and scientists are invited to give them clearly here.

The reasons of the experiment: Having a goal set is certainly useful, but is this goal well chosen? A new opportunity of discussing the goal from a broader perspective is proposed here: if a goal was decided, why was it chosen? Keeping a written track of the reason of the

Document d'enseignement

choice is perhaps a good practice, and in our experience it proved useful sometimes for being able to justify choices, in particular to reviewers. This field is also the place where the initial question has to be discussed and justified, in particular in view of the particular scientific strategy of the scientist.

Bibliographic research: This part can of course be very large, and the short explanation given in the DSR is certainly not enough to teach how to make it well. For more guidance, specific references are to be used (York University, 2017). Anyway, some sub-fields are given in order to help scientists to do it without having to move away from the work, such as:

- *estimation of the time needed for this bibliographic research:* Sometimes young scientists can spend too much (or too little) time on this part. Predicting a duration of the initial bibliographical research, or deciding for the amount of time allocated to this task, can be important for planning and work in general, as written before.
- *giving again the title of the work:* This will be used for focusing the bibliographic research, because as bibliographic work can be almost endless, from article to article, it needs pruning.
- *for each word of the title, a sub-field for which a specific research is done:* Grouping all the bibliographic research being done in this DSR avoids the distribution of pieces of information in many different files. Here the scientists are invited to make a research for at least each word of the title of the work. In particular, it is a good idea to make three parts: one for the state of the art about the question studied, one for the technical implementation of the experiment, and one for the data analysis and discussion methods.
- *should the initial research question be changed (slightly)?:* Sometimes the bibliographic research can lead to a redefinition of the initial scientific goal of the planned experiment. Scientists are invited to ask

themselves if this is the case. This does not imply that a published research cannot be repeated, but if such a decision is taken, there should be a justification for this choice (Peng, 2009).

One should also observe that if the research question is changed, after this first bibliographic survey, another round of bibliographic research can be necessary.

Preliminary observations: Frequently a particular research is done because previous experiments indicate that there was a possibility of a discovery or call for complementary work. Preliminary observations must guide the work being done. Finally, this field can give scientists the idea to make preliminary, such as non quantitative experiments, but it should be discussed whether it is a good idea, because it can take time. A proposed answer to this temptation of non quantitative research is to observe that it should be very short, otherwise it is probably better to make a very strict, rigorous, precise and quantitative determination.

Which theoretical assumption is tested by the experiment?: In our research group, we work with the debatable idea that experiments have to be done in order to test theoretical assumptions because scientists have to refute old ideas, or previous theories, or models, which are always insufficient (a reduced model of reality is obviously insufficient, being reduced, and not the reality itself) (Popper, 1972; Lecointre, 2012; This, 2009).

Of course, one can also make scientific research by simply using new analytical tools, without trying to refute previous theories: in this case, users of DSR have simply to write it down. More generally, DSR are guides that should help.

This field of DSR is useful for training users to be happy with negative results: if a prediction is proved wrong and if there was no logic or experimental mistake, it means either that the theoretical ideas on which it is based need improvement, or that a mistake in the theory is to be discovered, for example. Users have to recognize that guessing wrongly is fortunate,

Document d'enseignement

because there is a possibility of a discovery. Here, the field also contains the two sentences : "The theoretical analysis is:" and below "Accordingly, one asks if: "

Calculation on which the experiment is based: This section has different uses. One is to avoid that the experiment will be useless. For example, the use of an equipment of insufficient sensitivity or the analysis of a small number of samples can lead to "failure". In particular, statistical tests are very important, and they can be used before experiments, based on the estimated uncertainties. Also scientific theories and models are not like opinions, but ideas based on calculation (Galilei, 1623). This is why some quantitative planning is made to be done first.

Frequently, young scientists do not know which calculation they can make, but the sole presence of this field is welcome because it invites them to more training in calculus, and to use their skills in the particular context of experiments. As a hint, they are invited to use the Leibniz idea that formal calculus is based on natural language; this means that it is good training to translate the sentence of the previous field in formal, mathematical language (Knecht, 1981). Moreover in order to help them, some sub-fields are present, such as:

- *again, the initial question is repeated:* In order to have it readily under the eyes, then it is made abstract, generalized (Cramer, 2006; Jeannotte, 2017).

- *a theoretical model is built:* This particular sub-field is based on detailed best practices documents on calculation in natural sciences that includes making a scheme, introducing formal symbols, looking for relationships (equations) between symbols, designing a strategy for solving systems of equations, making numerical applications, discussing the formal results... (Redhead, 1980).

Prediction of the time needed for the experiment: This field is repeated many times in this document, because it is good to be able to adapt one's ideas to new information.

General method that you want to use (only one sentence, only the general idea, and not the detailed method, as it will be explained later): It is a good practice to have a general idea of one's work before considering details (Descartes, 1637), what could be said differently: considering strategy before tactics (Sun Tzu, 2017). Before students discuss the experimental details, they are invited to formulate a general idea of the experiment that they plan. More precisely, they are invited to begin this cell with a sentence such as : "The general idea is..."

Scheme of the experimental method: Here an important precision is added in the explanatory part: "*Caution: here one should not make beautiful pictures, because it would be time consuming, but only to represent the steps, IN ORDER TO identify the main parameters and to introduce SYMBOLS, giving also numerical values expressed in the International System (IS) of Units*". Indeed, the proposal to make a scheme of the experiment is only because it helps to characterize the phenomena, samples, tools, and to introduce parameters with letters, or symbols, so that they are used later on, in "laws", relationships, models, etc. (Redhead, 1980). As it is good practice to always begin some calculation by introducing letters and symbols, instead of numerical values, and to use these symbols during calculation, instead of numerical values. This is also the opportunity to drop numerical data, after translation into SI units.

The detailed method: This section is the core of the first of the three parts of DSR, and it is no surprise that it is divided into sub-fields, with hints:

- *first, the description of all experimental steps, precisely described, with hardwares, processes, everything:* Here, a table with two columns is to be filled. The first column lists the various steps with numbering, and the second one is for the justification of the choices of methods, hardware, reagents, for safety concerns (American Chemical Society, 2017a) and commentaries.

Document d'enseignement

This detailed numbered list is to be prepared before the experiment, and any intended action is to be described, so that all the hardware and all products and reagents are ready to be used, avoiding unintended processes.

When measurements are planned, their results are also planned: empty spaces are kept for the data to be recorded, as on a traditional laboratory notebook. Moreover, this field proposes to make three repeats for each data, preparing the calculation of a mean and a standard deviation. This table is to be copied and pasted later, in the "Results" section, but scientists are also invited to print it, and to glue the empty sheets on the laboratory notebook, in order to avoid having a computer on the laboratory benches.

Various advices are given for making this table, such as reducing the quantities of reagents and products (Grey, 1928). This is a best practice that anybody should know, but it is a fact that it is not always followed. Scientists are also reminded that experiments should be repeated, for example (Fisher, 1937; Tel Aviv University, 2017). The second column of the table in this field is for the justification of all choices: methods, tools, quantities, products, quality, variety, etc. Some hints are also given, concerning various characteristics of measurement tools (such as scale precision), but also about security sheets (American Chemical Society, 2017a), etc. Scientists are invited to explain any choice, because it is a good way to justify it and make it in a non arbitrarily way (American Chemical Society, 2017b).

Reagents, with, for each, the name, chemical and physical parameters, SECURITY rules (give the Security document as an annex of this file), purity (did you check it? How do you know that the product that was used is really the one whose name was written on the bottle? Did you make any purification, supplier, etc.: If the previous detailed description of the experiment was well done, then it is easy to fill this cell in (American Chemical Society, 2017a).

Indeed, the work to be done in this field is then simply to group all information, which will be useful in view of scientific publication, but also for

the discussion of the experiment. Of course, one need to collect here the IUPAC name of solvents, CAS numbers, but also their purity, grade, supplier...

The main point is however the hazard question: generally physical and chemical constant are needed to judge the danger of these reagents, but this is not enough. If users use reagents, they have to get the corresponding security file, and of course they have to read it, in order to decide for the security rules that they have to use. Concerning the end of the field, scientists are invited to know that it occurs that suppliers sell products with a lot more impurities than is displayed, or even make mistakes, changing one product for another! This makes checks necessary. Finally, the field contains the sentence "*Please don't kill you (and us)*", in order to emphasize the hazard issue.

Various products used in the experiment (such as food products); give all detailed information: brand, date, origin, batch number, etc.: For some researches, plant or animal tissues are used. In this field, one should write where these products come from, and give as much information as possible. The idea is obvious for senior scientists, but students have to know that in scientific publications, the choice of any particular detail has to be justified. Information on varieties, brands, batch number, etc. and more generally, quantitative information about these products anticipates potential questions of referees (Coyne, 2005).

Hardware: Again, if no step was forgotten in the detailed description of the experiment, this cell should be easy to fill in. If one has written "weigh (three times) the mass of a 250 mL Erlenmeyer", then the list of hardware must include the description of a particular scale. If one has written "record UV spectrum", there should be information on a particular UV-visible spectrophotometer that was used, the particular spectroscopic parameters which were chosen (and why), etc. DSR users are invited to give all details here: brand, model, specification, experimental conditions, date, time, temperature,

Document d'enseignement

etc. Also a list of software used (with references) has to be given (National Academy of Sciences, 1992).

How much time did you need in order to prepare the experiment: This corresponds to a previous section, and it is a way to improve planning skills, by a comparison of the predicted time for the preparation of the experiment, and the practical time used. Young scientists often under-estimate this time.

Here stops the DSR document before the experiment.

Second part: Results

Then comes the second part, about making the experiment. Now the various fields are:

Date: The reason of this field was explained before. At various steps of the work, time keeping is proposed.

Raw results: This field includes a copy of the table that was established previously, at the field "*Detailed description of the experiment*". But now, the data and various notes are introduced, during the experiment.

When measurement tools are connected to a local network (which minimizes hand writing and possibility of errors), their data are stored in files whose name is given here (directory, name of files, etc.). But sometimes, data or information are manually introduced, in particular when all hardware are not linked in a computer network.

Now the justifications of the second column are not needed any longer, and it is better when scientists write down instead some qualitative commentaries or remarks, or put pictures taken during the experiments.

Concerning qualitative results, scientists are reminded that there are many things to be observed during an experiment, and all this information is important either for the interpretation of results later, or simply for making new discoveries. The quality of a scientist is often

linked to the ability to see what others do not, a scientific quality that has been called "serendipity" (Jacques, 1990; University of California Museum of Paleontology, 2017). All clues are then very important, and young scientists have to know that chemists of the past were even smelling, tasting, hearing... Today smelling and tasting are preferably avoided, but the idea remains.

Results properly expressed: Tables full of figures are difficult to read, and it is an important part of scientific activity to translate these tables into elaborated information from which "laws" can be inferred (Tuft, 2001). Indeed, students have to be trained to the use of histograms, curves, and various ways of displaying quantitative information (Khamat and Hartland, 2014; Nature Editorial, 2017). However a common mistake is to confuse results and models, i.e. interpretations, and to link dots on a diagram without any prior (good) reason to do it. This is why scientists are reminded here that for this "Results" field, data should not be fitted (it is proposed to do it in the next section of the DSR).

Estimation of uncertainties, confidence intervals: Of course, if one made replicates of measurements or experiments, she/he can calculate average values and standard deviations. Sometimes, uncertainties are also needed, to estimate results. Indeed no curve (below) should be given without information on the quality of the results (JCGM, 2008).

Description of the trends on diagrams (this description will be cut and pasted in the "Discussion" part of the DSR): In order to interpret results, one has to be fully aware of them. Of course, all the information that one has to interpret lies in the diagrams that were made, but it was observed that young scientists need help in order to make the interpretations. This is why they are invited to describe their results with words and sentences, so that properly expressed ideas ("the curve starts at zero", "the curve seems to increase linearly", "there is an asymptote"...) can be discussed later.

Document d'enseignement

Other observations made during the experiments:
This field helps to remind users that many observations can be usefully done.

How much time did you need for this "Result" part of the work?: Again, this field is for training in administration, but also for quality and traceability.

Third part: interpretation and more

Too often, young scientists find the discussion steps difficult, because it is true that, whereas it is a core task for science, they lack methods in order to do it. There are also reasons: for example, the French mathematician and physician Henri Poincaré explained that the making of a model from the "laws" included an induction process, and not only deduction (Poincaré, 1905). Based on epistemological studies, some fields are proposed here.

Date: The goal is the same as for the corresponding fields above.

Prediction of the time needed: idem.

Fittings: The same diagrams as before are displayed here but now data points have to be linked by particular curves based on theoretical assumptions, as fitting a curve means interpreting, which is indeed discussion (Forster, 1999). Of course, when a fit is made, a quantitative estimation of the quality of the fitting (such as the residual sum of squares and its distribution, standard error...) is needed.

Formalization: introduction of new notions, concepts, quantitative parameters: Science means introducing new objects based on the laws, i.e. quantitative relationships that were discovered through the experimental work (Kuhn, 1962). Scientists are invited to do it here, using methods that can be discussed elsewhere.

Looking for laws, relations between parameters:
Here scientists are invited to translate what can be observed on diagrams into equations. More

generally equations have to be found between the introduced parameters of the previous field. In other words, when a trend is observed, it should be translated into mathematical language.

Numerical applications: Frequently determination of orders of magnitudes are needed in order to better understand equations. In particular, when large equations include many terms, it is good to be able to rank them by order of magnitude.

Discussion (explanation of results, trying to answer the « why » question using the bibliographic research): Scientists sometimes confuse using bibliographic data to confirm their results and discussing their results. This is because the interpretation of experimental results is difficult, and it is proposed here to divide the difficulty into smaller steps, for which sub-fields are proposed :

- *here users are invited to copy the results (field above), and to discuss them:* Each sentence from the "Results" section can become a question such as "why so and not differently?" Of course the answer should be quantitative!

- *then, for each sentence, use the bibliographic data and propose a quantitative explanation of the results:* Scientists are reminded that they have to take into account all the previous works, in order to make a comprehensive model. All this should be quantitative, not only with words such as: "our results are compatible with data from xxx *et al.*"

- *quantitative tests of the explanation:* Here users have to find the mechanisms that can explain the laws that were previously found, because laws alone are not the aim of science. It should be stressed that science should better refute wrong theories and that there are no "demonstrations".

Proposal of new concepts: Some consider as a good working assumption that any experimental

Document d'enseignement

result should be considered as a particular case of a general category (or more than one general category) that we have to look for.

This is the place to do the job. Here it is to be observed that many scientific journals are very cautious about sentences such as "This is the first time that" or "Our original results show...". Indeed one has to follow carefully the Instructions to Authors when writing a publication later.

Evaluation (did we reach the objective? etc.): Such a cell should finish the DSR, as it corresponds to the classic "Discussion and perspectives" that many articles include.

Proposals for the improvement of the technique and of the results: Frequently, users have to transmit their results to other users. It is helpful when they can propose improvement based on past experiments.

Conclusions: Same as in publications.

Perspectives: One should not forget to draw consequences of one's work, which means possibility of generalization, including tests of such proposals.

How much time did you need for this part: same as before.

Please don't forget: 1. Did you check the spelling? 2. Did you check the grammar? 3. Are there still adverbs or adjectives that you should translate into quantitative data? 4. Did you check the calculations (and how)? 5. Did you validate your work? 6. Do all diagrams have the right indications (units, abscissa, ordinate, title)? 7. Others. No comment needed.

Signature (for priority questions, patents, etc.): Lawsuits, patents, and careers have all been made or lost based on what was in, or not in, laboratory notebooks (Eisenberg, 1982; Meagher and Copeland, 2006; Taylor, 2006).

Finally, we have to add that DSR are *Maple* (or

any software which allow formal calculation as well as natural writing...) files, but the same content could be implemented with word processing software. However using such software would lead scientists to use other software for computing, leading to an increasing number of files for the same work. It is proposed that this spreadsheet, after being discussed by the whole scientific community, could become a general tool for science education and research, perhaps with modification for particular scientific disciplines.

References

American Chemical Society. 2017a. *Safety in academic chemistry laboratories*, <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/about/governance/committees/chemicalsafety/publications/safety-in-academic-chemistry-laboratories-students.pdf>, last access 2017-07-21.

American Chemical Society. 2017b. *Information for authors*, http://pubs.acs.org/paragonplus/submission/acsc/cc/acsc_authguide.pdf, last access 2017-07-21.

Bernard C. 1865. *Introduction à la médecine expérimentale*, <http://gallica.bnf.fr/ark:/12-148/btv1b86120273>, last access 2017-07-21.

Bybee RW, Powell JC, Trowbridge LW. 2008. *Teaching secondary school science: strategies for developing scientific literacy*, 9th ed, Prentice Hall, Upper Saddle River.

Caprette DR. 2017. Guidelines for keeping a laboratory record, *Experimental Biosciences*, <http://www.ruf.rice.edu/~bioslabs/tools/notebook/notebook.html>, last access 18 september 2017.

Chotkowski La Follette M. 1982. *Quality in science*, The MIT Press: Boston.

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)

Document d'enseignement

- Coyne GS. 2005. *The laboratory companion: a practical guide to materials, equipment and technique*, Wiley, Hoboken (NJ), 552 p.
- Cramer CA. 2006. *Abstraction and the classical idea, 1760-1920*, University of Delaware Press, Newark.
- Descartes R. 1637. *Discourse on the method of rightly conducting one's reason and of seeking truth*, <http://www.gutenberg.org/cache/epub/59/pg59.txt>, last access 2017-07-21.
- Du P, Kofman JA. 2007. *Electronic laboratory notebooks in pharmaceutical R&D: on the road to maturity*, <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1016/j.jala.2007.01.001>, last access 2017-07-24.
- Eisenberg A. 1982. Keeping a laboratory notebook, *Journal of Chemical Education*, 59, 1045-1046.
- FAO. 2017. *Planning for forest use and conservation guidelines for improvement*, <http://www.fao.org/docrep/w3210e/w3210e05.htm#TopOfPage>, last access 2017-07-22.
- Fisher RA. 1937. *The design of experiments*, Oliver and Boyd, Edinburgh-London.
- Forster M. 1999. *Curve fitting problem*. In *Cambridge dictionary of philosophy* (Audi R, ed), The Cambridge University Press, Cambridge.
- Galilei G. 1623. *The Assayer*, English translation by Thomas Salisbury (1661), p. 178, in *The Metaphysical foundations of modern science* (Burt, EA, ed), Dover Publications: New York, 2003, 75.
- Grey EC. 1928. *Practical chemistry by micro-methods*, W Heffer & Sons Ltd., Cambridge.
- Grogan K. 2008. *Science traceability*, <http://www.csc.caltech.edu/references/Grogan%20STM.pdf>, last access 2017-07-21.
- Harris DC. 1998. *Quantitative chemical analysis*, W. H. Freeman & Company: New York (5th edition).
- Jacques J. 1990. *L'imprévu, ou la science des objets trouvés*, Odile Jacob, Paris.
- JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology). 2008. *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*, www.bipm.org, last access 2017-07-21.
- Jeannotte D. 2017. *Les processus abstraite et généraliser conceptualisés dans une perspective commognitive*, http://emf.unige.ch/files/3614/6401/7985/EMF2015GT3JEANO_TTE.pdf, last access 2017-07-21.
- Kamat P, Hartland GV. 2014. *Graphical excellence*, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, Editorial, 5, 2118-2120.
- Knecht HH. 1981. *La logique chez Leibniz, essai sur le rationalisme baroque*, L'âge d'homme, Lausanne.
- Kühn M. 2017. *A summary of the international standard date and time notation*, <http://www.cl.cam.ac.uk/~mgk25/iso-time.html>, last access 2017-09-18.
- Kuhn TS. 1962. *The structure of scientific revolutions*, University of Chicago Press.
- MacNeil J, Falconer R. 2010. Keeping a laboratory notebook, *Journal of Chemical Education*, 87, 703-704.
- Lecointre G. 2012. *Les sciences face aux créationnistes. Ré-expliciter le contrat méthodologique des chercheurs*, Quæ, Versailles, 172 p.
- Meagher TF, Copeland RG. 2006. When learning the hard way makes learning easy, *Research Management Review*, 15, 1-13.

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)

Document d'enseignement

- Meyerson E. 1908. *Identité et réalité*, Vrin, Paris.
- National Academy of Sciences. 1992. *Responsible Science*, <https://www.nap.edu/download/1864>, last access 2017-07-21.
- Nature Editorial. 2017. Image doctoring must be halted, *Nature News*, 546, 7660.
- Normandin S. 2007. Claude Bernard and an introduction to the study of experimental medicine: "physical vitalism", dialectic and epistemology. *Journal of the History of Medicine and Allied Sciences*, 62, 495-528.
- Pagé J. Boisclair G. Mathieu R. 2014. *Guide des sciences expérimentales*, De Boeck, Bruxelles.
- Peng RD. 2009. Reproducible research and Biostatistics. *Biostatistics*, 10, 405-408.
- Poincaré H. 1905. *Science and hypothesis*, <http://www.gutenberg.org/files/37157/37157-pdf.pdf>, last access 2017-07-21.
- Popper KR. 1959. *The logic of scientific discovery*, Routledge Classics, London/New York.
- Popper KR. 1972. *Objective knowledge: an evolutionary approach*, Oxford University Press, Oxford.
- Redhead M. 1980. Models in physics, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 31, 145-163.
- Ryan P. 2017. *Keeping a lab notebook*, Office of integrated training education (National Institutes of Health), <http://molecular-gastronomyinternational.blogspot.fr/2017/09/de-ar-friends-this-morning-question-if.html>, last access 2017-09-18.
- Score. 2008. *Practical work in science: a report and proposal for a strategic framework*. Score, <http://www.scoreeducation.org/media/3668/report.pdf>, last access 2017-09-18.
- Sesen BA, Tarhan L. 2010. *Promoting active learning in high school chemistry: learning achievement and attitude*, *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 2, 2625-2630.
- Sone EM. 2014. *Guiding students to develop an understanding of scientific inquiry: a science skills approach to instruction and assessment*. *CBE-Life Sciences Education*, 13, 90-101.
- Sun Tzu. *The art of war*, <http://www.gutenberg.org/ebooks/132>, last access 2017-07-21.
- Taylor KT. 2006. *The status of electronic laboratory notebooks for chemistry and biology*, *Current Opinion on Drug Discovery and Development*, 9, 348-353.
- Tel Aviv University. 2017. *Replicability in science*, <http://www.replicability.tau.ac.il/index.php/replicability-in-science/replicability-as-a-central-dogma-in-science.html>, last access 2017-07-24.
- This H. 2009. *Cours de gastronomie moléculaire n°1 : Science, technologie, technique... culinaires : quelles relations ?*, Quae/Belin, Paris.
- This H. 2017a. <http://www.agroparistech.fr/Les-bonnes-pratiques-scientifiques-.html>, last access 2017-10-08.
- This H. 2017b. <http://www.agroparistech.fr/IMG/pdf/dsr.pdf>, last access 2017-09-27.
- Tuft ER. 2001. *The visual display of quantitative information*, Graphic Press, Nuneaton, 2nd edition.
- University of California Museum of Paleontology. 2017. *Understanding science*,

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)

Document d'enseignement

<http://undsci.berkeley.edu/article/serendipity>,
last access 2017-07-21.

York University. 2017. *Citing sources*,
<https://spark.library.yorku.ca/creating-bibliographies-citing-sources-part-of-academic-culture/>, last access 2017-07-21.

Edité par

Dominique Job, directeur de recherche émérite au CNRS, Laboratoire mixte CNRS-Bayer CropScience (Lyon), membre de l'Académie d'agriculture de France.

Rapporteurs

Michel Dron, professeur émérite de l'Université Paris Sud-Orsay (classe exceptionnelle), directeur honoraire de l'École doctorale « Sciences du Végétal » au sein de cette université, membre de l'Académie d'agriculture de France (section 1).

Loïc Rajjou, maître de conférence AgroParisTech, chercheur à l'INRA (Versailles).

Rubrique

Cet article a été publié dans la rubrique « Documents d'enseignement » des *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France*.

Reçu

25 juillet 2017

Accepté

30 septembre 2017

Publié

8 octobre 2017

Citation

This H. 2017. DSR: Frameworks for guiding experimental work in science. *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture*, 2017, 4(2), 1-14. <https://doi.org/10.58630/pubac.not.a372706>.



Hervé This est physico-chimiste, directeur du Centre international de gastronomie moléculaire INRA-AgroParisTech, directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences). Il est membre de l'Académie d'agriculture de France (section 8), membre correspondant de l'Académie royale des sciences, des arts et des lettres de Belgique.

Supplemental Material to the note 2017, 4(2) DSR: frameworks guiding experimental work in science

Hervé This ^{1,2}

¹ *UMR Ingénierie Procédés Aliments, AgroParisTech, Inra, Université Paris-Saclay,
91300 Massy, France*

² *Groupe de gastronomie moléculaire, Inra-AgroParisTech International Centre for
Molecular Gastronomy, F-75005, Paris, France*

Correspondance :
herve.this@inrae.fr

DSR

(document structurant de recherche)

A chaque ouverture de ce fichier, ne pas oublier de taper !!! (barre des tâches)

Explication/Mode d'emploi

Les DSR sont des documents qui regroupent TOUT à propos d'une **expérience à finalité scientifique ou technologique**.

Ils évitent notamment que, en cours d'expérience, on se retrouve à improviser (chercher un bécher, le laver, le sécher, alors qu'on en a un besoin urgent) et rater l'expérience, que l'on doit ensuite refaire (gênant quand elle prend un an !). Ils évitent aussi que l'on se perde dans mille documents différents, répartis dans des répertoires différents. C'est le seul fichier que tu auras besoin d'ouvrir pour ton travail, à l'exception des fichiers de données.

Attention à lire **TOUS** les mots : je ne compte plus le nombre d'erreurs qui sont survenues parce que les chercheurs/doctorants/étudiants sautaient des mots.

Tout cela doit être fait en se souvenant que **la science cherche les mécanismes des phénomènes**, à l'aide de la méthode -ici mise en oeuvre- suivante :

1. Identification d'un phénomène que l'on décide d'explorer, à la recherche de ses mécanismes, donc.
2. Caractérisation quantitative du phénomène (on fait des mesures).
3. Réunion des données de mesures en équations ("lois") ;
4. induction d'une théorie, qui regroupe les lois et introduit des concepts (quantitatifs, toujours quantitatifs). A noter qu'une théorie n'est jamais "exacte", parce que des modèles réduits de la réalité ne peuvent en aucun cas prétendre à être la réalité : autrement dit, nos théories sont et seront toujours approchées.
5. Recherche de conséquences testables de la théorie.
6. Tests expérimentaux de ces conséquences.
- 7 et suivant : Et ainsi de suite à l'infini ; la science n'aura jamais de fin.

En pratique, suivre mot à mot ce qui suit :

- commencer par ouvrir toutes les sections en allant dans affichage/sections
- remplir les champs les uns à la suite des autres en utilisant les conseils donnés en "explication" (ne pas changer les titres, mais écrire dans les sections et sous sections).

Surtout ne pas sauter de section : c'est la garantie quasi absolue d'erreurs, donc de fautes.

Et PENSER à celle ou celui qui lira ton DSR dans un an : cela implique qu'il faut **tout documenter**, ce qui signifie dire ce que l'on fait, précisément, et expliquer pourquoi on fait quelque chose.

(on peut utilement compléter cette explication en lisant le "Comment utiliser les DSR")

A noter, que pour chaque partie du DSR, il y a des "explications" : lis les bien, et, quand tu as fini, tu

peux les supprimer, si tu veux (ou bien les garder au cas où tu voudrais y revenir plus tard).

Petit bout de code qui charge les paquets utiles

Explication

Pour la bonne utilisation de Maple, il faut absolument nettoyer les mémoires, remettre les variables à zéro.

D'autre part, on charge des paquets spécifiques pour que les calculs se fassent bien (voir le Help de Maple).

A faire chaque fois qu'on ouvre le DSR ; exécuter la totalité en cliquant sur !!!, sans quoi les variables n'ont pas les valeurs qu'on leur a données lors d'une précédente ouverture du fichier.

Placer le curseur dans la liste d'instructions suivante, et taper Return (c'est-à-dire "Entrée") :

`gc() :`

`restart :`

`with(stats) :`

`with(plots) :`

`with(Statistics) :`

`with(plottools) :`

0. Pour préparer le travail

Nom du fichier

Explication

Pour t'y retrouver dans tes fichiers, nomme svp ce fichier « DSR Boris k », où Boris est ton prénom et k le numéro de ton DSR.

J'y pense, aussi : n'oublie pas que ce DSR est destiné à être lu (sinon, ce n'est pas la peine de l'écrire ;-)).

Or on ne répétera jamais assez que si quelqu'un d'autre que toi ne parvient pas à lire ce document, toi-même n'y parviendra plus dans quelques mois (je rappelle qu'une thèse, c'est plus que quelques mois).

Remplacer ceci par le nom du fichier

Titre du travail

Explication

Ici, on propose donc d'écrire un titre... mais sais-tu ce qu'est un « titre » ?

Puisque ce travail est destiné à être communiqué (rapport, publication...), cela vaut la peine de choisir un titre un peu « ronflant », très précis, sans être prétentieux toutefois.

C'est ainsi qu'on n'écrira pas « Cuisson d'un bouillon de carotte », car nous ne sommes pas en cuisine,

mais dans un laboratoire. Chaque mot doit appartenir au registre scientifique ou technologique, et la cuisson de bouillon de carotte précédente doit plutôt être « Analyse de la composition chimique de solutions aqueuses obtenues par traitement thermique de racines de *Daucus carota* L. dans l'eau à la température d'ébullition de cette dernière ».

Ici le titre

1. Préparation de l'expérience

Nom du scientifique

Explication

Tout document doit être signé, surtout par ces temps d'échanges numériques. Connais tu l'anecdote de Leo Szilard discutant avec Hans Bethe : quand Bethe parlait, Szilard prenait des notes. Bethe lui demande s'il pille sa pensée, et Szilard répond : "Non, je note au contraire que ces idées sont de toi". D'ailleurs, tu verras que, en fin de fichier, il est proposé que tu signes ce fichier, pour des raisons d'antériorité et de propriété intellectuelle.

Ici le nom

Date de création de ce fichier :

Explication

Cette indication (comme toutes les autres) a sa raison de figurer : notamment les travaux doivent être :

- de qualité
- traçable.

"De qualité" : on y reviendra. "Traçable" : cela signifie que l'on doit pouvoir refaire le chemin parcouru, non pas pour fliquer (seuls les médiocres ont des idées médiocres ; les gens de qualité ont des idées de qualité), mais pour comprendre d'éventuelles différences entre des répétitions d'une même expérience.

En outre, des indications telles que cette date permettent notamment de s'évaluer soi-même ultérieurement, de voir combien de temps on met à effectuer un travail, en vue de mieux prévoir, pour la prochaine fois.

Estimation du temps total du travail

Explication

C'est une bonne chose de comparer un temps estimé avec un temps réel : ça permet plus tard, dans un environnement professionnel, de bien savoir ce que l'on peut faire raisonnablement, donc de discuter avec une hiérarchie ou une équipe que l'on dirige.

Ici, ce sont des ordres de grandeurs que l'on donne sur la base d'une estimation "analytique" : on détaille chaque grande série de travaux, et on leur attribue une estimation de temps (on peut même diviser ces grands travaux en plus petits pour donner des temps plus fiables).

Objectifs du travail

Explication

Une expérience a un - ou mieux- plusieurs objectifs. Quels résultats vises-tu ?

Ce n'est pas un titre qu'il faut donner ici, mais une explication claire des objectifs. Bien sûr, il y a un recouvrement, mais on veut surtout que tout soit bien clair.

A propos du pluriel choisi pour "objectifs" : il est bon d'avoir un objectif clair, mais il faut aussi savoir qu'un projet qui a plusieurs objectifs simultanément peut avoir son intérêt, notamment au cas où l'objectif principal n'est pas atteint.

L'objectif principal est :

Les objectifs secondaires sont (mettre "aucun" s'il n'y en a pas) :

Les raisons de cette expérience

Explication

Je sais par expérience que beaucoup d'amis confondent l'objectif et les raisons de l'expérience. Oui, nous avons un objectif, mais pourquoi l'avons-nous ? C'est cela qu'il faut dire ici.

Autrement dit, il s'agit d'écrire ici :

1. pourquoi on fait l'expérience ;
2. pourquoi on veut atteindre les objectifs énoncés précédemment.

J'explique : on ne fait pas des expériences pour faire des expériences. Il y a certainement une raison de faire l'expérience. Ou des raisons.

Autrement dit, si tu veux faire une expérience, c'est parce que tu as des raisons de la faire. Lesquelles ? Cette case se distingue de la précédente, en ce qu'elle permet de se mettre un pas en arrière de soi même : pourquoi as-tu l'objectif que tu as affiché ci-dessus ?

- 1.
- 2.

Etude bibliographique

Explication

Quand on fait une étude bibliographique, c'est ici qu'il faut la faire. Pour un travail scientifique, la partie qui suit doit être très volumineuse : environ un an de travail pour se mettre à niveau (c'est-à-dire la première année des thèses).

Evidemment, quand on fait un stage court, il n'est pas possible de faire ce travail complet, mais il vaut mieux avoir été regarder (par exemple sur Google scholar ou Web of science) ce qui s'est publié sur le sujet dans les cinq dernières années.

Le dosage de ce travail doit être bien choisi. En parler, sans se lancer dans des jours de travail de "mine".

Sinon, dans le principe, il faut bien dire que cette étude bibliographique te permet de savoir ce qui a

déjà été fait, ce qui peut conduire à modifier éventuellement l'objectif initial d'un travail.

D'autre part, je renvoie vers le "Comment faire une étude bibliographique", mais, en gros :

1. prendre chaque mot du titre du travail, et faire une section avec ce mot.

Par exemple, si le titre est "Dosage par spectroscopie d'absorption atomique des ions métalliques passés en solution aqueuse après traitement thermique de tissus végétaux en présence du saccharose ("confiture"). Influence du *pH*.", on fera d'emblée la structure suivante :

dosage

absorption atomique

tissus végétaux

traitement thermique des tissus végétaux

saccharose

confiture

pH des confitures

Puis, dans chacune de ces sections, les nouvelles notions seront elles-mêmes à l'origine de sous-section. Par exemple si l'on a mis le mot "pectine" dans la section "tissus végétaux", on fera une sous-section "pectine".

2. puis, dans chaque section ou sous-section, introduire une sous-sous section pour chaque article.

Mon conseil, le titre de cette sous-sous section gagne à être du type : numéro (qui sera utilisé dans toute la suite) entre crochets, nom général de sujet, mot particularisant, auteur, date :

[Numero]pectine gelation Wehr 04

Alkali hydroxide-induced gelation of pectin

J. Bernhard Wehr*, N.W. Menzies, F.P.C. Blamey 1

Food Hydrocolloids 18 (2004) 375–378

Dans cette sous sous section, faire **copier coller des phrases du texte** avec les références données par le texte.

Par exemple :

"

Pectin can undergo gelation, forming a network comprising the pectin backbone and trapping solute molecules within the network (BeMiller, 1986).

BeMiller, J. N. (1986). An introduction to pectins: structure and properties. In M. L. Fishman, & J. J. Jen (Eds.), *Chemistry and function of pectins* (pp. 2– 12). Washington: American Chemical Society.

Cette section du DSR a un autre intérêt : souviens-toi que ce DSR est la base d'une publication ou d'un rapport. En réalité, ces raisons sont l'introduction de la publication ou du rapport. Voilà pourquoi, ici, il est bon de discuter les raisons de l'expérience, notamment à l'aide de la bibliographie qui aura été réunie.

Plus précisément, le déroulé du texte qui figure ici doit généralement être :

- initialement, il y a une question posée
- pour éclairer cette question, on cherche des publications scientifiques qui se rapportent aux divers aspects de la question : on cherche sur internet ou dans des bases de données scientifiques en anglais, au pire sur **Google scholar (jamais des sites grand public : nous faisons un travail scientifique ou technologique, pas du baratin de vulgarisation), et on récupère une série d'articles, les plus récents possible. Notons que les données doivent être récentes et "officielles" : par exemple, pour des données moléculaires on pourra utiliser PubChem (du NIH).**
- chaque article récupéré doit être « lu » : « lire », toutefois, ne consiste pas à lire ; il faut lire scientifiquement, ce qui consiste à faire une série aussi abondante que possible de copier/coller des parties des articles récupérés. Il faut tout préparer, et si l'on a besoin d'articles complémentaires, on fait de même avec les articles complémentaires ;
- puis on repose la question un peu différemment, à la lueur des articles lus.

J'y pense : il est utile de lire tous les mots du moule DSR vide : il y a des indications importantes. Ici, par exemple, il faut répéter que **cette partie bibliographique doit généralement comporter plusieurs pages, ou dizaines de pages.** Un article qu'on lit bien livre une montagne d'informations... d'autant que pour chaque phrase de l'article, on doit ajouter les références que cite l'article.

D'ailleurs, ajoutons que l'on doit se procurer les articles référencés par l'article qu'on lit, et les « lire » ensuite, de la même façon, crayon à la main (ou, plus exactement, ordinateur sous les doigts), en prenant le plus de notes possible.

Bref, lire scientifiquement, ce n'est pas lire, mais écrire très abondamment !

Et, enfin, il faut absolument dire si l'article cité est bon ou pas : voir le "Comment évaluer article".

Estimation du temps de bibliographie

Explication

C'est une bonne chose de comparer un temps estimé avec un temps réel : ça permet plus tard, dans un environnement professionnel, de bien savoir ce que l'on peut faire raisonnablement, donc de discuter avec une hiérarchie ou une équipe que l'on dirige.

Ici, ce sont des ordres de grandeurs que l'on donne sur la base d'une estimation "analytique" : on détaille chaque grande série de travaux, et on leur attribue une estimation de temps (on peut même diviser ces grands travaux en plus petits pour donner des temps plus fiables).

Ici, répète le titre de ton travail

Explication

Comme indiqué plus haut, c'est en utilisant chaque mot du titre complet que l'on peut faire une bibliographie complète.

Et maintenant, fais une sous section pour chaque mot du titre, et fais la bibliographie pour chaque mot, afin de connaître l'état de l'art

...

Observations faites lors d'expériences personnelles préliminaires ou observations expérimentales faites par autrui, notamment lors d'expériences préliminaires (en se souvenant que la vie est trop courte pour mettre les brouillons au net, et qu'il vaut donc mieux faire des "brouillons nets")

Explication

Il s'agit d'évoquer ici des expériences qui ont été faites (par toi ou par des membres du groupe) avant que ne commence ce DSR.

Fréquemment, les expériences sont faites pour suivre d'autres expériences, faites auparavant, qui ont ouvert de pistes ou appelé des précisions, des études complémentaires.

D'autre part, certaines observations guident la méthode choisie, parce qu'elles conduisent à des hypothèses théoriques que l'on veut tester (voir case suivante)

Attention : si cette case figure ici, après la bibliographie, c'est qu'il s'agit d'indiquer ici autre chose que les résultats de la bibliographie : des expériences personnelles (ou celles de proches) faites de façon préliminaire.

S'impose enfin une discussion concernant la dernière phrase "en se souvenant que la vie est trop courte pour mettre les brouillons au net, et qu'il vaut donc mieux faire des brouillons nets" : parfois, on peut avoir envie de faire une expérience préliminaire où l'on ne fera pas de mesures précises, où l'on aura seulement une idée du déroulement expérimental. Pourquoi pas... mais seulement si cette expérience prend très peu de temps (disons une ou deux heures maximum).

Quelle hypothèse théorique est testée par cette expérience ?

Explication

Pour un travail scientifique ou pour un travail technologique, c'est bien d'avoir une idée théorique, afin de la confronter à l'expérience : au minimum, l'expérience donnera des données et une confirmation ou une réfutation de nos idées théoriques.

Ici, ne pas le faire sous cette section, mais le répartir dans les sections à cet effet : "L'analyse théorique est la suivante", puis "De ce fait, on prévoit que"

L'analyse théorique est la suivante

Explication

Ici, il s'agit d'écrire une analyse théorique du phénomène que l'on explore. Tout ce que tu as appris dans tes études supérieures peut enfin servir !

Exemple

Par exemple, si tu étudies la libération des sucres par une carotte que l'on cuit dans l'eau, tu peux écrire :

On place dans l'eau des racines de carotte

Ces racines sont des organes végétaux qui captent la sève brute, et stockent les produits du métabolisme foliaire (essentiellement sucres et acides aminés).

La sève (brute ou élaborée) circule dans les tissus conducteurs (canaux du xylème et du phloème).

Quand on coupe la carotte en rondelles, les canaux sont ouverts et en communication avec le liquide.

De sorte que les métabolites foliaires peuvent sortir par diffusion.

De ce fait, on prévoit que :

Explication

C'est ici qu'il faut faire une hypothèse que l'on peut tester par l'expérience.

Exemple

Avec l'exemple du bouillon de carottes, on en vient à prévoir que l'analyse du liquide montrera des sucres et des acides aminés, qui augmenteront jusqu'à un équilibre.

On pourra aussi prévoir une modification chimique des composés qui auront diffusé.

De ce fait, on prévoit que :

Calcul sur lequel l'expérience envisagée est fondée :

Explication

Cette section sert notamment à s'assurer que l'on fera une expérience qui n'est pas vouée à l'échec. Ici, faire un soliloque et utiliser le "squelette de calcul" (voir ce document).

En science, les théories et les modèles ne sont pas de la poésie, mais des groupes d'idées étayées par des calculs. Voici pourquoi un calcul s'impose avant toute expérience.

Dans le fond, cette case doit contenir l'expression quantitative de l'hypothèse théorique précédente.

Comme cela est difficile, on te guide, en détaillant, avec des sous parties.

(ici ne rien écrire, passer directement à la sous-section "Ici, la question...")

Ici, la question étudiée est répétée, abstraite, remachée, ruminée (laisser les scores)...

Explication

On reprend la question que l'on se pose, on la réécrit, afin de bien l'avoir sous les yeux.

Puis on examine les mots, et on cherche quelque chose de plus abstrait que la petite question que l'on considérait initialement.

On cherche à généraliser.

La question que l'on se pose est :

On examine les mots :

Et un modèle théorique

Explication

Un modèle, c'est une description en termes d'équations, une schématisation de l'expérience, voir le "squelette de calcul" et le podcast sur le calcul du volume de mayonnaise).

Avec cette rumination, on arrive à une description théorique, générale.

N'hésite pas à faire un schéma !

On introduit des paramètres et des symboles (des lettres pour un calcul formel) pour décrire complètement -et quantitativement!- le modèle :

Explication

Nous étions arrivés à une description en mots. Il faut maintenant passer à une description en termes de variables, d'inconnues, de paramètres formels.

Ce n'est pas une étape difficile : on prend chaque mot (ça chauffe, du courant passe...) et l'on cherche à quantifier le phénomène décrit (température, intensité ou potentiel...).

Enfin, on cherche les relations entre les paramètres, en relation avec la question :

Explication

Par exemple, si l'on chauffe une masse d'eau, on tire de sa besace un $Q = M c (T_2 - T_1)$. Si l'on a un courant et une tension, on écrit un $U = RI \dots$

Prévision du temps de préparation de l'expérience

La méthode générale d'étude envisagée

Explication

Une phrase seulement : ici, on décrit la méthode générale, pas les détails de la méthode, qui seront donnés plus bas.

Je répète : ne pas donner la méthode étape par étape (qui viendra ensuite), mais la description générale du chemin qui sera suivi, l'idée dont la méthode détaillée donnée plus loin sera l'explicitation.

Pour te faciliter le travail, ne faire que compléter la phrase qui commence ci dessous.

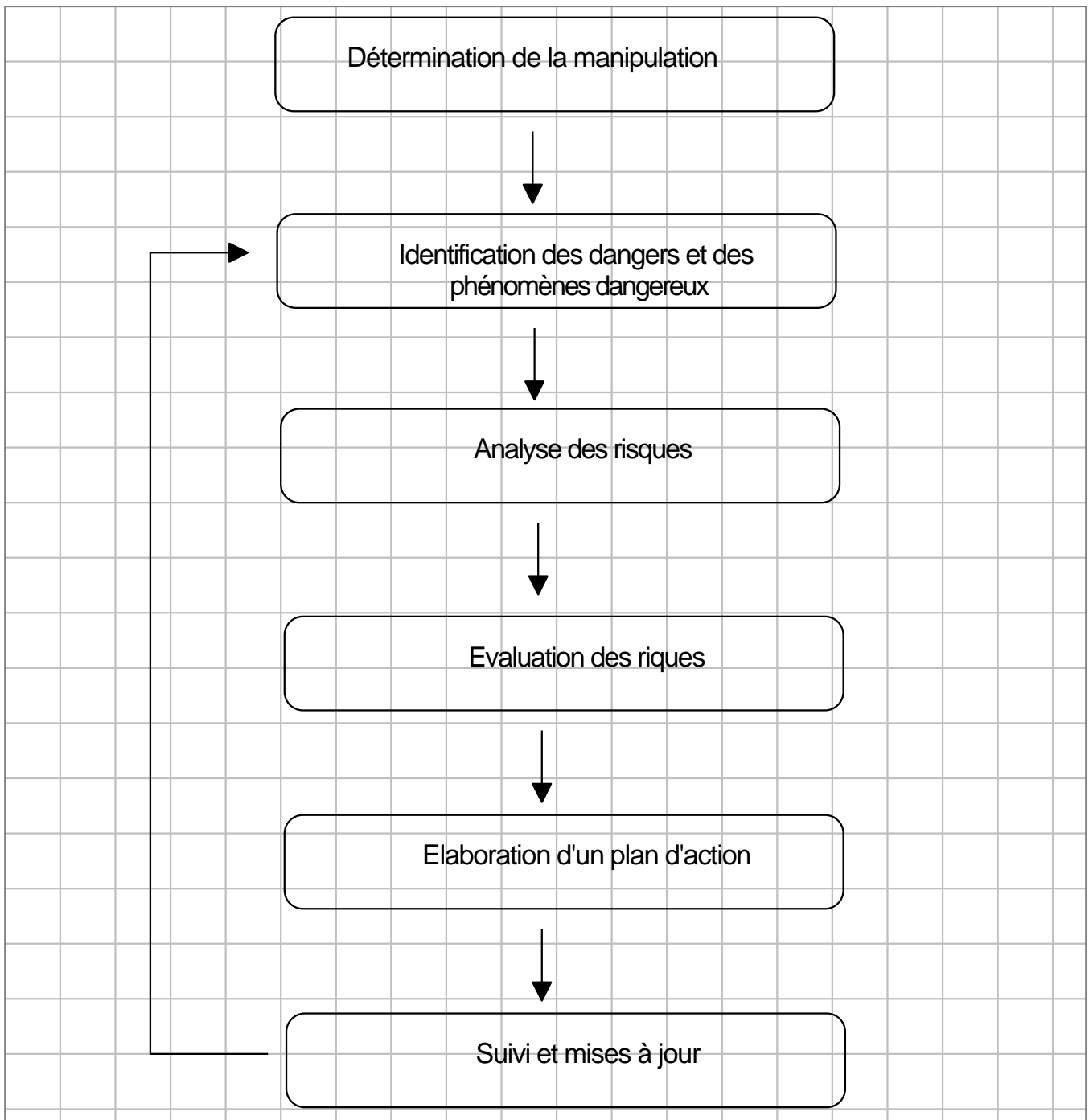
L'idée générale de la méthode est ...

La question de la sécurité

Explication

On ne fait pas d'expérience sans envisager les risques. Non seulement pour soi, mais aussi pour les autres, et l'on se souvient que les maîtres mots d'un bon travail de chimiste sont "sécurité, qualité, traçabilité".

Voici le schéma général à appliquer :



Ci dessous, on suit donc ce schéma.

Identification des dangers et des phénomènes dangereux

explication

On imagine bien la méthode, pour identifier les dangers : on considère chaque geste expérimental, et on cherche les dangers afférents.

Mais comme on n'est pas encore arrivé à la méthode détaillée, on se dit que c'est peut-être plus tard que

l'on doit faire ce travail. Oui et non. Oui, on peut très bien reprendre toute cette partie Sécurité après que le schéma détaillé a été fait. Mais le faire a priori n'est pas inutile, car cela peut nous conduire parfois à changer de méthode, si l'on détecte des dangers excessifs.

Analyse des risques

explication

Ici, il faut savoir que tout est dangereux, et que c'est le risque qui est à réduire. Et ce dernier dépend à la fois du danger intrinsèque (du cyanure, c'est plus dangereux que du sucre) et de l'exposition (le cyanure dans un tube que personne ne manipule, c'est avec peu de risque).

Elaboration du plan d'action

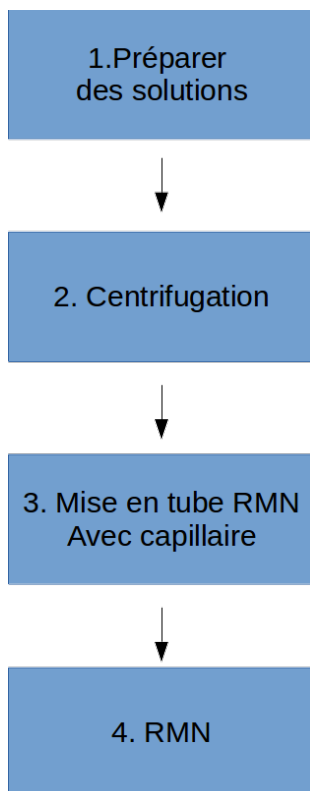
explication

Il faut évidemment réduire les risques.

Schéma général de l'étude (fonctionnel !)

Explication

Attention : il ne s'agit pas de faire des images, ce qui est idiot.
Il s'agit d'énumérer les étapes de l'étude (liste numérotée).



Le BUT, c'est d'identifier les principaux paramètres expérimentaux (par exemple température) et d'introduire des SYMBOLES.

Puis, on introduit des données numériques (représentées par des symboles) exprimées en unités du Système international d'unités.

L'idée est de MONTRER LES ETAPES ET D'INTRODUIRE LES PARAMETRES QUANTITATIFS (symboles) utiles.

Il faut expliquer que les schémas sont des œuvres de dessinateurs, pas de scientifiques. On se moque de la représentation des colonnes à reflux, et la raison pour laquelle on veut ici un schéma qui soit plutôt un organigramme, c'est seulement parce que l'on veut une sorte de garde fou, qui permette d'éviter les calculs numériques foireux, et qui rappelle que les calculs doivent toujours être formels (d'où Maple –par exemple, mais n'importe quel autre logiciel de calcul formel convient- en outil permanent sur ton bureau).

Répetons : tout calcul doit être formel, et c'est seulement quand on obtient une formule finale que l'on remplace les lettres par des valeurs numériques, exprimées en unités du Système international d'unités. Mieux encore, on peut, si l'on veut, commencer par introduire les divers paramètres numériques, en les désignant par des lettres. Par exemple, si l'on impose un courant de $5 \mu\text{A}$, ou si l'on utilise une masse de 250 mg , on écrira ici $I = 5\text{E-}6 \text{ A}$, $m = 2.50\text{E-}4 \text{ kg}$.

La méthode détaillée

Explication

Dans ce qui suit, il faudra fermer les yeux et imaginer tous les gestes qui seront faits : cela permettra de bien lister les produits, matériels...

Attention à l'usage des indices qui a planté plein de monde (voir le des bases maple) ! Surtout pas de tarabiscotage, mais seulement, des numéros d'ordre : 1, 2, 3... A noter qu'il y a un document "C indices" à ce propos : c'est le moment de le lire.

Et une seule opération par ligne, avec une case vide que l'on coche, comme dans une check-list.

Toutes les étapes bien décrites en pratique, avec les matériels, les produits, les gestes, tout !

Explication

Puisque nous sommes dans la partie "préparation", et pas la partie "expérience", c'est seulement la préparation de l'expérience que l'on fait.

Première chose : faire de petits tableaux pour les diverses étapes de l'expérience, et, pour chaque étape, bien détailler tous les gestes, en numérotant. **A cette fin, partir des étapes représentées dans la section précédentes "Méthode générale" et inscrites dans des sections.**

Et pour chaque section (il y en a 3 de préparées ci dessous, mais en faire évidemment autant que nécessaire), avoir un tableau à deux colonnes.

L'idée, c'est de mettre TOUS les gestes dans la colonne de gauche, et leurs justifications dans la colonne de droite.

Ici, se donner de l'air avec autant de lignes de blanc que possible, et, mieux encore, numéroter TOUS les gestes (étapes) séparément, **en évitant de mettre plusieurs gestes avec le même numéro : faire le plus d'étapes élémentaires possibles et ajouter des cases à cocher**

Ce tableau, quand il sera fini, peut être discuté avant qu'on se lance dans l'expérience pratique.

Mais surtout, quand on fera l'expérience, on ne sera plus dans la partie "préparation", mais dans la partie 2. Autrement, il faudra prendre seulement la colonne de gauche, faire copier, et aller faire coller dans la partie. Ce tableau de la partie 2 ("expérience"), une fois qu'on aura éliminé les lignes de blanc, sera imprimée, et collée dans le cahier de laboratoire. C'est dans le cahier de laboratoire que l'on suivra le protocole, et c'est dans ce même cahier de laboratoire que l'on écrira les valeurs des mesures, et autres (par exemple, le nom d'un fichier d'un spectre RMN, assorti du chemin informatique pour le trouver). Autrement dit, aucune valeur de mesure, aucun résultat, dans cette partie préparation.

On y va. Dans le tableau ci dessous :

◦ Introduis les paramètres indiqués plus hauts, et laisse un blanc après, de sorte que, quand tu auras imprimé cette partie et que tu l'auras collée dans le cahier de laboratoire, il te suffira de noter les valeurs mesurées dans les cases toutes prêtes (il faut qu'il y ait assez de place).

- Pense dès maintenant qu'une expérience doit être répétée trois fois au moins.
- A noter que cette sous-section, une fois finie, devra être donc copiée-collée dans la partie "Résultats".
- N'oublie pas que tous les gestes, matériels, méthodes doivent être JUSTIFIES par des références méthodologiques, tel le livre de l'AOAC ou une publication.
- Pense MICROCHIMIE : ce n'est qu'exceptionnellement que l'on utilise des quantités aussi EXAGEREES que le gramme. Normalement, c'est du mg.
- Enfin, n'oublie pas que CE N'EST PAS ce tableau qu'il faudra remplir quand tu feras l'expérience : ce sera la copie de celui-ci, qui aura été mise dans la partie Résultats. Aucun résultat d'expérience ici svp.

A propos des réactifs, il faudra donner le nom, les caractéristiques physico-chimiques, les constantes, les références fabricant, les règles de sécurité à appliquer... Attention : les notices de sécurité doivent être données maintenant en annexe ; ne pas Ici, il faut le maximum d'information. Un mois après, il sera trop tard pour remplir cette case, et l'expérience prouve que l'on s'en mordra les doigts, parce que l'on ne saura pas répondre aux questions légitimes des rapporteurs !

D'autre part, les informations sur les réactifs sont indispensables pour comprendre les résultats, envisager des interprétations, prévoir de nouvelles expériences.

Bien sûr, il faut donner les noms IUPAC des composés (sais-tu ce que c'est que l'IUPAC ?), des solvants, leur grade, leur pureté, etc. Mais il faut surtout se poser des questions de sécurité : c'est ici que l'on évite de mettre en danger les autres et soi-même. Il est interdit d'utiliser un solvant dont on ne connaît pas le danger.

Ici, c'est la méthode détaillée que l'on décrit, et c'est une bonne chose que de la décrire en utilisant des numéros d'ordre, d'où leur présence dans la case.

Le détail doit être suffisant pour que quelqu'un refasse l'expérience à partir de cette description, de sorte que tous les paramètres, toutes les actions doivent être indiqués.

Cette description sera notamment utile pour remplir les cases précédentes (matériels, produits) : il suffira de savoir lire.

Par exemple, si l'on lit : « peser avec une balance à 0,001 g », on saura qu'il faudra indiquer plus bas : « Balance OHAUS, précision 0.001 g ».

Cela étant, c'est la justification qui est importante : chaque étape doit pouvoir être justifiée, soit par une référence bibliographique, soit par référence à un travail expérimental qui a déterminé le choix des paramètres, matériels, produits...

Et finalement, peut-être qu'avoir l'organigramme sous les yeux est une bonne chose.

J'y pense : fais le plus de lignes (étapes numérotées possible), en mettant des lignes de blanc dessus et derrière, afin d'avoir de l'air, et de penser de façon lente. Puis, quand tu copieras ce tableau dans la partie 2, tu enlèveras ces lignes de blanc (seulement dans la partie 2) afin de ne pas gâcher de cahier de laboratoire.

Tableau à copier et coller dans chaque sous section de la méthode détaillée

--	--

Les étapes	La justification des opérations, des matériels, des réactifs, les dangers éventuels ... Ajoute des commentaires
1. Noter : <input type="checkbox"/> Date : <input type="checkbox"/> Heure : <input type="checkbox"/> Température : <input type="checkbox"/> Hygrométrie :	
2. <input type="checkbox"/> Tarer	On utilise la balance XXXX, de caractéristiques xxxxx.
3. <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Peser trois fois un bécher de 50 mL : $m_1 := [\quad , \quad , \quad]$	On choisit un bécher parce que ...
4. <input type="checkbox"/>	

Ici, la méthode générale que l'on va développer

Explication

Attention : ce tableau est un tableau préparatif seulement. Une fois qu'on l'a fait, on le copie et on le colle plus loin, dans la partie expérimentale (ici, on est seulement dans la partie de préparation de l'expérience)

Récapitulation de la liste complète des réactifs, produits... :

Explication

Ici, on va donner toutes les indications expérimentales ultérieurement nécessaires pour un rapport, une publication...

Réactifs :

Explication

Pour chacun, donner :

- le nom,
- les caractéristiques physiques,
- les caractéristiques chimiques,
- les données de sécurité,
- la pureté (a-t-elle été contrôlée, notamment par RMN ?),
- le fournisseur,
- le numéro de lot,
- et d'autres informations supplémentaires, spécifiques de l'étude . Error, missing operator or `;`

Ici, il faut le maximum d'information. Un mois après, il sera trop tard pour remplir cette case, et l'expérience prouve que l'on s'en mordra les doigts, parce que l'on ne saura pas répondre aux questions légitimes des rapporteurs !

D'autre part, les informations sur les réactifs sont indispensables pour comprendre les résultats, envisager des interprétations, prévoir de nouvelles expériences.

Bien sûr, il faut donner les noms IUPAC (sais-tu ce que c'est que l'IUPAC ?) des solvants, leur grade, leur pureté, etc. Mais il faut surtout se poser des questions de sécurité : c'est ici que l'on évite de mettre en danger les autres et soi-même.

Il est interdit d'utiliser un solvant dont on ne connaît pas le danger : ce serait comme de traverser une route en ignorant si c'est une route de campagne déserte ou le périphérique !

La question de la pureté est également terrible : je ne raconterai jamais assez que, étudiant les vins bouchonnés, nous avons acheté du trichloroanisole chez Sigma Aldrich, pureté 99,9%, mais que, après des essais étonnants, un passage du produit en RMN nous a montré que 50 % du produit n'était pas celui marqué sur l'étiquette!!!!!!

Idem : l'équipe de Jean Marie Lehn a eu des résultats incohérents pendant un an parce que le produit vendu n'avait rien à voir avec le produit acheté. Méfiance : ce qui est écrit n'est pas toujours juste!

Divers produits utilisés lors des expériences :

Explication

Par exemple, les produits alimentaires.

Pour chacun, donner le plus d'information possible (si on achète ces produits chez un commerçant local, demander l'origine, la date de production, le producteur, le lot, etc.

Il faut savoir que, dans une publication, le choix de chaque détail expérimental doit être expliqué.

Anticipe donc les questions des rapporteurs de la publication, et indique les variétés, marques, numéro de lot, etc. Le plus possible, du quantitatif svp.

Matériels utilisés (donner tous les détails!) :

Explication

Il s'agit ici de dire quel matériel est utilisé. Mettre TOUS les détails de TOUS les appareils.

Si tu veux éviter de tout retaper, tu peux aller chercher dans la liste des matériels du groupe, et faire un copié-collé.

Bien tout noter, comme par exemple :

Balance: type, précision, dérive, date du dernier contrôle, utilisation éventuelle (conseillée !) d'un étalon secondaire pour le contrôle, etc.

Matériels :

Logiciels :

Explication

Regarde une publi pour savoir ce que l'on a besoin d'écrire ! Tu y verras par exemple "Maple 18.1, Waterloo Maple Inc, Toronto, Canada".

Estimation du temps nécessaire pour faire l'expérience :

Explication

Dans ta vie professionnelle, tu auras besoin de dire à ton patron de combien de temps tu as besoin pour un travail donné, et, si tu diriges une équipe, tu devras savoir comment fixer des objectifs réalistes, ou évaluer les propositions qui te seront faites.

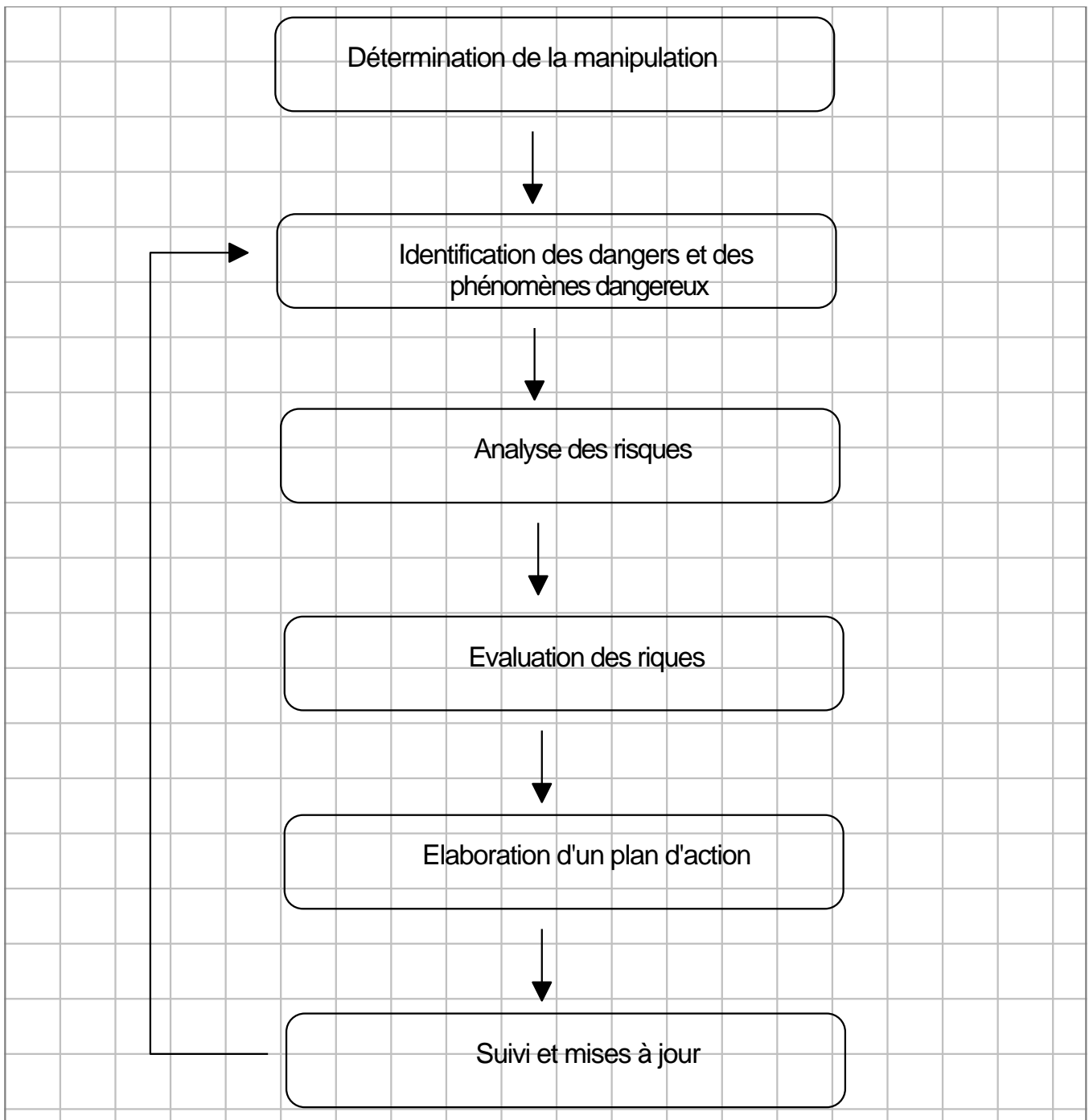
Il faut donc t'entraîner à connaître les temps nécessaires pour les travaux. Error, missing operator or `;`

La question de la sécurité, après la méthode détaillée

Explication

Cette fois, nous disposons de la méthode détaillée, de sorte que nous pouvons réviser notre plan a priori.

Comme précédemment, on applique le plan



Ci dessous, on suit donc ce schéma.

Identification des dangers et des phénomènes dangereux

explication

On imagine bien la méthode, pour identifier les dangers : on considère chaque geste expérimental, et on cherche les dangers afférents.

Mais comme on n'est pas encore arrivé à la méthode détaillée, on se dit que c'est peut-être plus tard que

l'on doit faire ce travail. Oui et non. Oui, on peut très bien reprendre toute cette partie Sécurité après que le schémas détaillé a été fait. Mais le faire a priori n'est pas inutile, car cela peut nous conduire parfois à changer de méthode, si l'on détecte des dangers excessifs.

Analyse des risques

explication

Ici, il faut savoir que tout est dangereux, et que c'est le risque qui est à réduire. Et ce dernier dépend à la fois du danger intrinsèque (du cyanure, c'est plus dangereux que du sucre) et de l'exposition (le cyanure dans un tube que personne ne manipule, c'est avec peu de risque).

Elaboration du plan d'action

explication

Il faut évidemment réduire les risques.

Combien as-tu mis de temps à préparer l'expérience ? Différence avec la prévision ?

Maintenant, on se concentre sur les résultats expérimentaux.

2. L'expérience

Date:

Résultats, incluant des observations qualitatives (ici, on peut mettre des photographies prises pendant l'expérience, ou bien des phrases telles que "Ca jaunit") :

Explication

C'est ici que tu colles la première colonne (**seulement la première colonne !**) du tableau précédent (méthode détaillée de la partie 1):

- copier ce tableau dans un nouveau document Maple
- supprimer la colonne de droite
- appliquer le programme de suppression des lignes blanches inutiles
- recoller le tableau dégraissé ci dessous
- l'imprimer et le coller dans le cahier de laboratoire.

Puis, tu rempliras le tableau avec les valeurs expérimentales (donc après l'expérience), mais nous verrons plus loin comment tu peux faciliter le travail en ne saisissant qu'une valeur dans la première partie de la variable, puis en saisissant dans les deux autres champs ce qui change.

Par exemple, si tu as fait un tableau où apparaît :

$$m_{31} := [\quad , \quad , \quad]$$

et si tu as consigné dans ton cahier de laboratoire des valeurs :

$$m_{31} := [10.7277 , 10.7278 , 10.7276]$$

alors tu verras plus loin que nous utiliserons Maple pour que tu te limites à rentrer dans le DSR :

$$m_{31} := [10.7277 , 8 , 6]$$

Evidemment, il peut y avoir des cas plus tordus, comme si tu as dans ton cahier de laboratoire :

$$m_{31} := [10.0001 , 10.0002 , 9.9999]$$

Cette fois, la proposition est que tu entres dans la feuille :

$$m_{31} := [10.0001 , 2 , 9.9999]$$

Puis nous te proposons d'ajouter une seconde colonne, en faisant Format/Tableau/Insertion/Colonne à la droite.

C'est dans cette colonne que Maple qu'il est intéressant de consigner des observations, des commentaires, et aussi des 'références vers des dossiers qui contiennent des photos prises pendant l'expérience (afin de ne pas alourdir le fichier excessivement).

Préparation générale

Les étapes	La justification des opérations, des matériels, des réactifs, les dangers éventuels .. . Ajoute des commentaires
1. Réunir le matériel et les produits : <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Ici, on récapitule après avoir rempli le tableau.

<p>2. Laver et sécher (comment ?) tout le matériel</p> <p><input type="checkbox"/></p> <p><input type="checkbox"/></p> <p><input type="checkbox"/></p> <p><input type="checkbox"/></p> <p><input type="checkbox"/></p> <p><input type="checkbox"/></p>	<p>On lave de la façon suivante (référence) :</p> <p>On sèche ainsi (référence) :</p>
<p>3. Noter :</p> <p><input type="checkbox"/> Date :</p> <p><input type="checkbox"/> Heure :</p> <p><input type="checkbox"/> Température :</p> <p><input type="checkbox"/> Hygrométrie :</p>	

Ici, donc, coller seulement la première colonne du tableau de préparation des expériences

Et maintenant, ajouter au tableau une colonne à droite, en faisant Format/Tableau/Insertion/Colonne à la droite.

Reporter les observations, commentaires, notes prises pendant l'expérience, etc.

A la suite de quoi on fait calculer par Maple les moyennes et les écart-types (ici pour les masses, mais si tu as d'autres données, tu peux le faire facilement en changeant les noms) :

Explication

L'idée du calcul qui suit est de faire une boucle, avec autant de tours que de triplets de mesure $m_i := [\quad , \quad , \quad]$, et le calcul de la moyenne et de l'écart-type pour chaque triplet de mesure.

Là, il faut se mettre dans le groupe de code qui suit et taper "Enter" (ou "Entrée", ou "Return") :

```

for i from 1 to nops(m) do
   $m_i[1] := m_i[1]$  :
  compteur := 0;
  for j from 1 to length(convert(m[1], string)) do
  if substring(convert(m[1], string), j)  $\neq$  substring((convert(m[2], string), j)) and compteur = 0
    then cat(substring(convert(m[1], string), 1..j), substring((convert(m[2], string), j + 1
      ..length(convert(m[2], string)))))) : compteur := compteur + 1 end if
  end do;

```

```

compteur := 0;
for j from 1 to length(convert(m[1], string)) do
if substring(convert(m[1], string), j) ≠ substring(convert(m[3], string), j) and compteur = 0
then cat(substring(convert(m[1], string), 1..j), substring(convert(m[3], string), j + 1
..length(convert(m[3], string)))) : compteur := compteur + 1 end if
end do;
end do;
for i from 1 to nops(m) do
mmoyi := Mean(mi[1], mi[2], mi[3]);
sdi := StandardDeviation[1](mi[1], mi[2], mi[3]);
end do;

```

Resultats correctement exprimés : ici, transformer les tableaux de données en figures, diagrammes, histogrammes, courbes... (ici, aucune courbe ne doit relier des points expérimentaux ; cela sera fait plus loin) :

Explication

Dans l'étape précédente, on a obtenu des points de mesure, des spectres, etc.

C'est cela que l'on affiche maintenant, et, comme dit dans l'intitulé de cette rubrique, on ne met que le points de mesure, sans les incertitudes, et, surtout, sans relier les points entre eux !

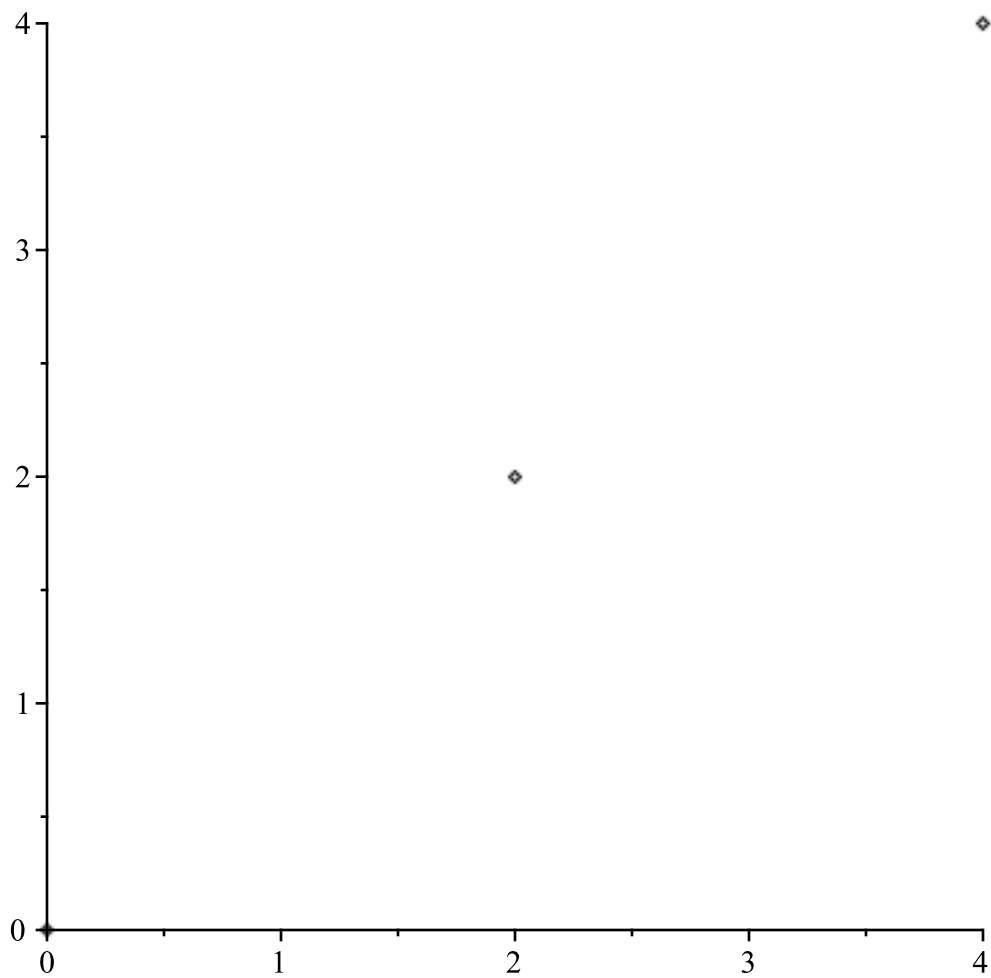
A noter que Maple a des options pour cela (voir plot/options), à savoir que, dans un affichage par un "pointplot", il y a l'option connect=true, ou style=line, ou encore style=pointline... A NE PAS UTILISER ici.

Pourquoi ne pas relier les points ? Parce que des résultats sont des résultats. Les lignes entre les points ne sont pas des résultats, mais des interprétations de ces derniers. Et puis, qu'est-ce qui nous prouve que l'on n'a pas des choses, entre les points, là où l'on n'est pas encore allé voir ? Par exemple, avec les points :

```

with(plots) :
with(plottools) :
pointplot( {[0, 0], [2, 2], [4, 4]})

```



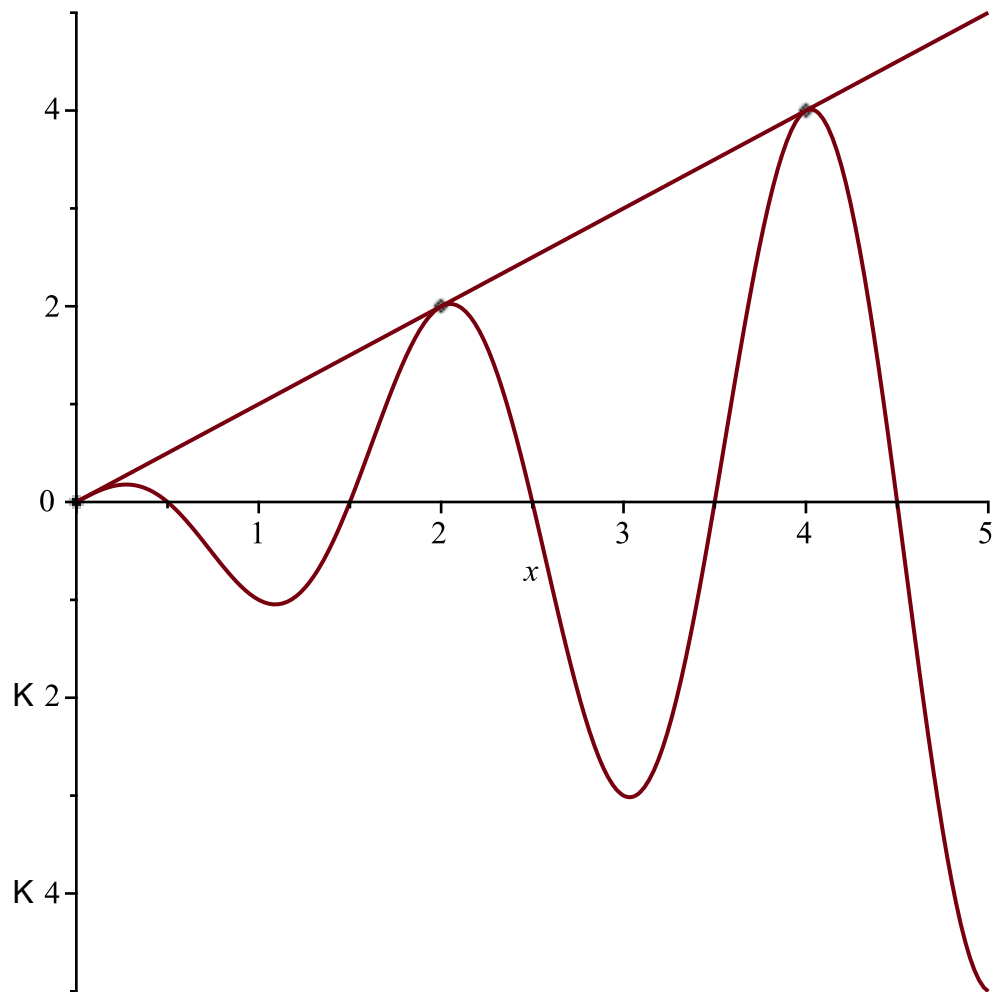
On peut tout aussi bien avoir une droite qu'une sinusoïde :

$a := \text{pointplot}(\{[0, 0], [2, 2], [4, 4]\}) :$

$b := \text{plot}(x, x=0..5) :$

$c := \text{plot}(x \cdot \cos(\pi \cdot x), x=0..5) :$

$\text{display}(a, b, c)$



Autres observations effectuées durant l'expérience :

Explication

Quand on manipule, il y a une foule de choses à voir, d'observations à faire, de notes à prendre. Personnellement, je branche un dictaphone et je ne cesse de dicter des remarques. Ce sont ces informations complémentaires qu'il est proposé de consigner ici.

Combien de temps as-tu mis ? Comparaison avec la prévision ?

Explication

Maintenant commence l'interprétation.

Attention : on fait généralement trop d'expériences, et bien trop peu d'interprétations!

3. Mise au propre des résultats, interprétations, conclusions, perspectives

Date

Prévision du temps nécessaire pour faire cette partie ?

Explication

Comme précédemment. Attention de bien penser que patouiller avec Maple peut prendre du temps !

Expression éventuelle des résultats en fonction de valeurs particulières (par exemple la masse de sodium par rapport à la masse séchée de carotte

Explication

Là, ce n'est pas obligatoire, mais on part souvent de résultats d'analyse, et on doit les rapporter à des valeurs initiales d'échantillons.

Cela se fait pas à pas, en remontant la méthode détaillée vers le début de l'expérience

Le schéma inversé de l'expérience

Puis les calculs, étape par étape, en partant de la fin

Estimation des incertitudes, des intervalles de confiance, etc. (quand c'est nécessaire ; sais-tu quand ça l'est ?) :

Explication

Là, je sais d'expérience que beaucoup d'entre nous ont du mal à faire cela. Disons tout d'abord que des points de mesure sans incertitudes, c'est NUL ! (moi, professeur, je mets 0/20 à des gens qui affichent à autrui des valeurs sans incertitudes... sauf quand ils indiquent en légende que les incertitudes sont plus petites que les points, par exemple.

D'autre part, tu es invité/e à aller voir le "Comment incertitudes", qui dit comment faire ces calculs, et ces affichages.

En substance, il faut se souvenir qu'une valeur ne doit être affichée qu'avec ses chiffres SIGNIFICATIFS... lesquels dépendent des incertitudes.

Ensuite, il y a environ deux cas :

- soit l'incertitude est donnée par l'instrument de mesure (par exemple 1 g pour une balance (im)précise à

1 gprès

- soit l'incertitude est donnée -c'est une convention internationale- par l'écart-type de 3 mesures.

Mais il faut une méthodologie pour "propager" des incertitudes, ce qui signifie tenir compte de toutes les incertitudes sur toutes les opérations à toutes les étapes. La méthode est donnée ci dessous, pour être mise en oeuvre, mais elle tient en :

- représenter toutes les étapes
- indiquer les incertitudes à chaque étape
- partir du résultat final, et exprimer chaque résultat en fonction du précédent.

Reproduis ici le schéma général (pour l'avoir sous les yeux)

Copie et colle ce schéma général. Puis, pour chaque étape, ajoute les incertitudes

Calcule les incertitudes en partant de la fin, et en remontant vers les premières opérations

Resultats amendés : les mêmes représentations que précédemment, mais avec les incertitudes

Explication

Ici, c'est simple : il suffit de prendre les représentations trouvées en fin de deuxième partie, et d'ajouter les incertitudes.

Par exemple, sur un graphe ou sur un histogramme, tu ajoutes de petites barres correspondant aux incertitudes

Description en mots des résultats obtenus juste (indiquer les tendances, les variations, etc. ; cette partie sera recopiée dans la partie Discussion) :

Explication

Certes, un tableau de nombres est indigeste, mais une courbe, un graphe, un histogramme, etc. méritent mieux qu'un simple affichage.

Tu auras besoin plus loin, pour les interprétations, des résultats exprimés en langage naturel.

Pour cette description, pense à bien faire le gros avant le détail.

Ajustements (les mêmes résultats que précédemment, mais les données expérimentales doivent être reliés par des courbes particulières, justifiées par des choix théoriques). Ne pas oublier d'afficher les résidus :

Explication

Supposons que des points soient alignés : on aura tendance à tracer une droite qui passe au mieux par les points, et cela est un "ajustement", qui peut se faire -par exemple- par une régression linéaire. Les résidus sont les écarts des valeurs mesurées au modèle. Et cela vaut toujours la peine de s'assurer qu'ils sont aléatoires, qu'il n'y a pas de biais, notamment.

Formalisation: introduction de nouvelles notions, concepts, paramètres quantitatifs

Explication

Pour avoir une théorie, il faut "induire" (et non pas déduire) des notions, concepts nouveaux, quantitativement compatibles avec les équations produites par les ajustements.

Recherche de relations ("lois") entre les paramètres (si tu vois une tendance, exprime la mathématiquement)

Explication

Applications numériques

Explication

Discussion (explications des résultats, à l'aide de la bibliographie, afin de répondre à la question "pourquoi").

Explication

Contrairement à une idée largement répandue, les discussions ne doivent pas dire "nous trouvons telle valeur tout comme Untel" : cela ne serait pas de la science, mais simplement de la vérification.

Ici, colle les résultats (en les prenant de plus haut) et ajoute une discussion : pour chaque phrase, fais une question du style "pourquoi est-ce ainsi et pas différemment?".

Explication

Puis, pour chaque phrase, utilise la bibliographie pour proposer une explication du résultat (pas d'inventions personnelles)

Explication

Puis teste l'explication quantitativement (en essayant plutôt de la réfuter que de la montrer)

Explication

Proposition de nouveaux concepts (chaque résultat expérimental peut être considéré comme un cas particulier des cas généraux qu'il faut inventer)

Explication

Ici, on part donc de l'ensemble des équations théoriques, et il faut arriver à leur donner un cadre cohérent. En réalité, c'est ici l'essentiel du travail scientifique !

Evaluation (as tu atteint l'objectif, etc.)

Explication

C'est un automatisme à avoir : quand on fait un travail, il y a (1) une question, (2) le travail proprement

dit, (3) la solution trouvée et (4) l'évaluation. Il est toujours bon d'apprendre à s'évaluer, si l'on ne veut pas que les autres s'en chargent.

Attention : les gens biens s'évaluent toujours trop sévèrement, et les faibles avec trop d'indulgence.

Proposition d'améliorations de la techniques ou des résultats

Explication

Conclusions

Explication

Utile de se demander, finalement, si tout cela a quelque intérêt !

Autres perspectives

Explication

Les conclusions, c'est une chose, mais rien de pire que les gens contents d'eux. La question n'est pas de savoir si la théorie décrit bien les résultats, mais, surtout, comment les résultats permettent (ou non) de réfuter, donc d'améliorer la théorie. On ne répétera pas assez que quand les résultats confirment une prévision, on a fait une vérification, mais quand ils sont contraires à ce que l'on imaginait, on a (peut-être) fait une découverte.

Combien de temps as-tu mis ? Comparaison avec les prévisions ?

Explication

C'est ici que les précédentes estimations trouvent leur sens, leur intérêt : en comparant ce que l'on avait prévu avec ce qui a été fait, on apprend à mieux estimer, pour le futur.

Arbres et rameaux

Explication

Dans une expérience, on ne peut pas tout faire, et il y a lieu d'avoir un endroit où l'on conserve - précieusement- les idées expérimentales qui nous viennent et qu'il faudra faire un jour. Cela peut être fait ici.

A noter qu'il y a un "Comment arbres et rameaux", que l'on pourra utilement lire.

La touche finale

Explication

Quand un travail est terminé, il n'est pas "fini", et il s'agit donc de faire mieux. Ici, la question, au delà du respect que l'on se doit à soi même, est de bien s'assurer que quelqu'un qui reprendra le travail puisse comprendre quelque chose. La "touche finale", au delà des aspects matériels sans intérêt, vise aussi et surtout cela.

As tu vérifié :

1. L'orthographe ?
2. La grammaire?
3. Reste-t-il des adjectifs et des adverbes, qui doivent être remplacés par des réponses à la question "combien?"
4. As tu validé les calculs (comment) ? Es tu prêt à parier une caisse de champagne qu'ils sont justes ?
5. Les diagrammes ont-ils tous les bonnes indications (unités, abscisses, ordonnées...)
6. Autres... Tiens, voici une petite liste :

Automatismes à avoir

Initialement, la liste des "automatismes à avoir" était limitée à une vingtaine de recommandations, fondées sur des décennies d'observations de fautes à la revue Pour la Science, notamment comme éditeur et comme rédacteur en chef : je n'indiquais que les erreurs les plus courantes (connaissez-vous la différence entre une faute et une erreur ?).

Mais des relectures de textes scientifiques me montrent qu'il y a lieu de lier la pensée à l'écriture. Et la liste a grossi, de sorte qu'il a fallu la structurer.

Aujourd'hui, la liste est un peu longue, mais son existence reste un motif d'optimisme : il suffit de passer et repasser sur un texte pour écrire mieux que la très grande majorité de ceux qui doivent prendre la plume !

Des questions scientifiques :

Un bon scientifique dit combien, donne des (bonnes) références, donne ou réclame les moyens de la preuve.

Pas d'adjectif : c'est du baratin. Remplacer par la réponse à la question "Combien?"

Idem pour les adverbes

Les chiffres sont-ils tous bien significatifs? Cela doit avoir été soit calculé (calculs d'incertitudes, affichés conformément au GUM du BIPM), soit mesuré par des écarts-types.

Parler des phénomènes avant de donner leur caractérisation. Par exemple, c'est parce que de l'eau chauffe que sa température augmente !

Une proportion est... une proportion (c'est l'objet). Si l'on souhaite, on peut éventuellement l'exprimer en %, mais pourquoi pas comme une proportion, simplement ?

L'abréviation de 1000, c'est k, et non pas K (kelvin)

Un flux n'est ni un courant ni un débit ; c'est un flux.

"qui varient" ne signifie pas "est compris entre xxxx et xxxx"

Quand on donne un résultat, il faut le protocole correspondant !

Cinétique et thermodynamique sont perpendiculaires.

"Des études antérieures" : lesquelles, au juste ?

"D'après certaines études" : lesquelles, au juste ?

Attentions aux mots de plus de trois syllabes... qui cachent souvent de l'ignorance, ou de l'idéologie, par exemple : dénaturation, agrégation, coagulation... Savez vous vraiment ce qu'ils signifient : par exemple, passez svp quelques secondes pour vous demander ce qu'est une agrégation.

Ecrire nombre (s.d ecart-type), et non pas nombre ($\pm xxx$). Le " \pm " est réservé aux incertitudes.

Les coefficients de corrélation expriment de la corrélation, pas nécessairement de la causalité (les attroupements sur les quais ne font pas venir les trains).

Attention au mot "diffusion", qui est utilisé à tort et à travers : une diffusion, c'est seulement une diffusion. Il y a à ce propos un très utile article de mon ami José Miguel Aguilera, et al. : Fat Migration in Chocolate: Diffusion or Capillary Flow in a Particulate Solid?—A Hypothesis Paper, Vol. 69, Nr. 7, 2004— Journal of food science R167-174.

On part de courbe d'étalonnage, pas de courbe de calibration

On parle d'étalon, ce qui n'est pas la même chose qu'un standard ou un calibre

Le mot "équivalent" ne signifie ni "égal", ni "du même ordre de grandeur"

Une masse sèche est une masse sèche, à ne pas confondre avec une masse séchée (dans des conditions à préciser)

Une déconvolution n'est pas une décomposition : n'utilisons pas de mot qui semble faire "chic", mais avec lesquels on se fait ramasser !

Vérifier que tous les "significativement" et les "significatif" correspondent bien à un calcul statistique.

Un code n'est ni un programme ni un logiciel

Avant de balancer une équation, dire ce que l'on calcule.

Pas de métaphore, pas d'usage métaphorique des termes ! Un impact, par exemple, n'est pas un effet.

Une masse est une masse, et pas seulement une "quantité"

Partout où il est écrit « augmente », « diminue », "est égal" ou "équivalent", chercher tout cela est bien significatif (sinon virer l'indication de tendance).

Pas de jargon : la clarté est la politesse de ceux qui s'expriment en public.

Toujours préciser la forme des sucres (D-glucose).

Une hypothèse doit être assortie d'un calcul, sans quoi c'est aussi nul que de se demander comment faire tenir Paris dans une bouteille.

Lipides : de quoi parle-t-on au juste, de triglycérides ? d'acides gras? de cholestérol?

Quand on évoque des petits sucres ou des acides gras, ou des acides aminés : parle-t-on de formes libres, ou bien de résidus d'acides gras, de résidus d'acides aminés et de résidus de sucres dans

(respectivement) des triglycérides, des protéines, des polysaccharides ?
Quand on parle d'une molécule, en donner la structure moléculaire.
Des axes de graphiques bien indiqués, avec éventuellement leurs unités.
Une publication qui est invoquée : il faut dire précisément ce qui est dit, et ne pas en changer les phrases.
D'ailleurs, un résultat de cette publication doit venir avec le protocole qui y a conduit.
Attention au mot "expliquer", car la science n'explique pas : elle produit des descriptions quantitatives
Ne surtout pas chercher à valider des hypothèses, mais au contraire chercher à les réfuter !
Attention au mot "diffusion" : cf. l'article de José Aguilera.
Les mots de plus de trois syllabes sont "interdits"
Carbohydrate : dénomination pourrie, tout comme chlorophylle au singulier, par exemple, mais quand même pire, car on n'en est plus au temps où l'on croyait qu'une molécule d'eau était attachée à chaque atome de carbone ! ; utiliser saccharides
Pas d'hypothèse sans calcul
Attention aux mots "preuve", "démonstration", "vérité" : cela n'a pas sa place en sciences de la nature

Des questions de correction intellectuelle

Commencer par donner l'objectif.

Eviter les adverbes, c'est le commencement du style : recherche systématique de "ment", et suppression des adverbes inutiles.

Attention à la différence entre « technologie » et « technique » (et « science »)

"Complexe" : c'est un mot pourri, qui veut le plus souvent laisser penser que l'on est très savant parce que l'on étudie des choses difficiles (penser à "compliqué" ?)

"Les deux types d'objets" ne signifie pas "les objets des deux types".

"Selon Machin" : le mot "selon" introduit un doute... parce qu'il y a des connotations.

Plus grand, plus petit, inférieur, significativement différent, etc : a-t-on calculé une ANOVA ? Que vaut F ?

Une méthode n'est pas une technique

Un modèle ?

Une ACP n'"explique" pas ; en revanche, des groupes peuvent être séparés

Les chiffres sont-ils tous significatifs (calcul d'incertitude, ou bien écart-type) ?

Chaque phrase doit être assortie d'une référence à un bon texte qui établit l'idée de la phrase.

Des questions de clarté :

Chaque phrase est-elle limitée à : Sujet verbe complément ? Si non, mon conseil est de diviser. Comme écrire par de telles phrases est souvent bien difficile par nos amis et par nous-même, pourquoi nous laisserions-nous aller à faire plus long ?

Ce qui se dit en un mot est toujours plus clair que ce qui se dit en deux mots. Plus généralement, tout ce qui est superflu est gênant.

Remplacer des "on va faire" par "on fera" : le futur n'est pas fait pour les chiens (à savoir : naguère, et encore aujourd'hui dans certains cercles, le futur est interdit, parce qu'il n'est pas sain intellectuellement, dans la mesure où il est imprévisible ; on disait "demain, je vais au marché... si Dieu le veut").

Pas de "et/ou" qui ne signifient à personne, ni même à toi.

Les métaphores compliquent parfois plus qu'elles n'expliquent.

A-t-on annoncé la couleur : dans chaque début de paragraphe, a-t-on dit ce que l'on allait trouver dans le paragraphe ?

Avant tous les intertitres, y a-t-il une phrase disant pourquoi on passe au passage suivant ?

Ne pas craindre les répétitions naïvement

Un point suivi de "en effet" peut être avantageusement remplacé par deux points

La terrible faute du partitif : un niveau peut être d'énergie, mais pas énergétique ; et l'exemple le plus courant est le "cortège présidentiel", qui n'est le plus souvent que le cortège du président. Je critique très énergiquement le nom imbécile donné il y a peu à la Société française de chimie, qui est devenue (une faute) la Société chimique de France : société peut être française, mais pas chimique !

Des conventions :

Ecrire les nombres entiers en lettres jusqu'à 10, et en chiffres au delà, sauf si l'on veut donner des nombres décimaux bien sûr.

Les noms d'unités sont en minuscules, sauf quand ce sont des noms de personnes, et seulement pour l'initiale, pas pour le nom complet : 1 K, mais 1 kelvin.

s est l'abréviation de secondes (pas sec). et min ne prend pas de s, quand il y en a plusieurs

Des questions de grammaire qui pourrissent la lecture :

Un infinitif ou un participe présent doivent avoir le même sujet que celui de la principale. Chercher (fonction recherche) systématiquement les "ant" et les "er"

"Après que" est suivi de l'indicatif

Des questions de mots qui sont gênants ou fautifs :

Chercher les "rendre" plus adjectif : "rendre possible" = "permettre" : recherche systématique de "rend"

Remplacer "semble probable" par "est probable" (pléonasme)

De même, « faire obstacle », c'est « gêner » ; etc.

Les "ils impersonnels poussent à la faute : "il semble qu'il fasse" = "il semble faire" : recherche systématique de "il semble", etc.

Pas de "mais" ni de conjonction de coordination (et, ou, car ...) en début de phrase : rechercher les "

Mais", ".Car", ".Et", ".Ou" et remplacer par des ", mais", ", car", ", et", ", ou"

Attention à l'inflation des "très" ; on peut généralement les éliminer

Rechercher le verbe pouvoir, et chercher à l'éliminer. Remplacer systématiquement (ou presque) les "a pu montrer", "a pu observer", etc. par « a montré, observé, etc » ; "pour pouvoir comparer" : pour comparer

Attention à "impliquer" (contamination de « to imply »)

« Sophistiqué » signifie « frelaté », mais pas « complexe » ni « évolué »

Plus haut n'est pas plus intense, ni plus grand

Significatif n'est pas notable

« Brutalement » n'est pas « brusquement »

Attention à "véritable" (« véritable révolution » !) : le plus souvent, ce n'est précisément pas véritable.

Attention à « influencer » sur et « influencer »

Attention aux anglicismes : les plus fréquents sont : « se baser sur », « des douzaines », « réaliser » n'est pas « comprendre » ; remplacer « contrôler » par « commander » ou « déterminer » (contrôler, c'est faire une vérification), « compléter » n'est pas « achever » ; rechercher « développer » au sens de « mettre au point » ; idem pour « développement »

Remplacer « par contre » par « en revanche »

Attention aux usages exagérés de « permettre »

Rechercher « suggérer » : normalement, la suggestion, c'est l'hypnose

Rechercher « affecter »

Rechercher « processus » : un processus n'est une réaction, ni une série de réactions, ni un procédé

Rechercher " induire " parce qu'il est souvent utilisé fautivement

Rechercher emmener/emporter

Ne pas chercher la rallonge : "dans lequel" peut souvent devenir "où".

On ne dit pas "débute" mais "commence" (sauf au théâtre)

On ne dit pas "en dessous de ", mais "au-dessous de" ;

On dit plutôt "chaque fois" que "à chaque fois" ;

Eviter "au niveau de" et très généralement faire attention au mot « niveau » (recherche automatique)

Quand on rencontre "entre eux", "entre elles", vérifier que c'est utile ; de même, « les uns des autres », « les uns aux autres », etc. sont souvent inutiles

« ceci » annonce alors que « cela » se rapporte à ce qui a déjà été énoncé (le plus souvent, on peut se débarrasser de ces mots faibles) ; idem pour "celui-ci", "celui-là", "celle-ci", "celle-là", "ceux-ci", "ceux-là", "celles-ci", "celles-là"...

Des chevilles comme "en fait", "en réalité", "effectivement", "Du coup" sont rarement utiles

« plus petit » est « inférieur », « plus grand » ou "plus élevé" est « supérieur »

« très inférieur » est fautif (il faut écrire « bien inférieur ») ; de même pour « très supérieur » ... mais de toute façon, la question, c'est "combien ?"

« être différent » donne « différer » ;

Utiliser "second" (pour deux possibilités seulement) et "deuxième" pour plus de deux

Examiner si les "simples", "compliqués", "facile" sont indispensables.

Souvent remplacer « appelé » par « nommé »

Les verbes "présenter" et "constituer" peuvent souvent être remplacés par "être" ou "avoir"

Attention : "plus important" doit signifier qu'il y a une importance plus grande ; souvent on doit le remplacer par supérieur. Plus généralement, chercher systématiquement le mot "important", et chercher à l'éradiquer.

Attention à la signification des mots (pas impact mais effet / répartition et distribution; méthode/technique)

Le mot "significatif" ne signifie pas notable (et vice versa)

La "littérature", c'est la littérature, pas des publications scientifiques

Un étalonnage n'est pas une calibration, et une référence n'est pas un standard

Une matière séchée n'est pas une matière sèche

Remplacer les mots "faibles" ou "convenus" par du contenu réel (le mot "introduction" est moins bien que la question posée)

"Dans le but" est fautif : si on est dans le but, celui-ci n'est plus un but (remplacer par : afin de, en vue de, dans le dessein de)

"celui obtenu" : en français, il est obligatoire de ne pas omettre le "qui est"

"sur" signifie "dessus"

"au niveau de" suppose un niveau

un "impact", c'est un impact, et pas un effet

"en fonction" signifie "en fonction", mais "selon" a un sens différent

"Nommer", c'est donner un nom ; "appeler", c'est faire un appel

"si" introduit une condition, alors que "quand" introduit une circonstance

"basé sur" est un anglicisme ; il faut écrire "fondé sur" (sauf quand on parle d'une base, bien sûr).

"dur", c'est dur, mais "difficile", c'est difficile ; et "délicat", c'est délicat !

Un ratio ? un rapport

Arrêtons avec ces drastiques, voire ces dramatiques, quand on veut dire beaucoup, ou considérablement

"développer" signifie développer, pas "mettre au point"

Une "problématique" ? Moi, ce que je sais, c'est que ce mot est souvent... problématique !
"Est-ce que ... est" : Est-il
On doit, il faut : interdit
Au fur et à mesure de : lors de
Éviter les termes étrangers : c'est prétentieux (un "shift", c'est un décalage)
"survit" ne signifie pas "subsiste"
"générer" : beuh ! produire ?
La "manière" suppose la main ; c'est différent de la façon
"donner naissance" : il faut une naissance
"au bout de" : "après", sauf s'il y a un bout !
Dans un exemple que l'on donne, "comme" n'est pas "tel"
Attention à "débuter" : faire ses premiers pas d'artistes (donc différent de commencement, démarrage)
"En d'autres mots" : "autrement dit"
chance et risque : connoté ; dire probabilité
Un groupe n'est pas un groupement
Plus généralement, une bonne façon d'écrire plus précisément consiste à ne pas pisser les mots, mais les choisir. Et si l'on n'est pas capable de faire cela au premier jet, faire, après ce premier jet, un crible qui considère chaque mot ! Je rappelle que l'on peut s'interroger sur le sens des mots en consultant <http://atilf.atilf.fr/>. Aller surtout à la fin, pour l'origine et l'étymologie.

Des questions de typographie :

Ne pas sauter de ligne, sauf 2 avant un intertitre, et 1 après celui-ci
Les quantités sont en italiques, ainsi que les mots en langue étrangère, et de très rares items (noms de bateau, titre de livre...)
Pas de souligné : c'était quand on n'avait pas d'italiques
Quand on cite des gens, on doit citer le premier et le plus récent, pas arbitrairement au milieu.
Partout des virgules décimales, pas des points
Cf s'écrit "cf.", pas Cf
Pas de maquette quand on écrit (ça vient après)
Dans un nom propre, seul le premier substantif est en majuscule, sauf si adjectif avant : "Seconde Guerre mondiale"
Dans les citations, ordre d'années (Toto et al., 1991; Titi et al., 1998)
Usage AFNOR des dates : 2019-10-08.
Les indices doivent venir en indices.
Les symboles de quantités en italiques.
Les vecteurs : du gras italique ou des flèches dessus.

Des questions de maquette

Tout au fer à gauche pour commencer
Pas de blancs bizarres. Seulement deux lignes de blanc avant un titre, et une ligne après
Pas de ligne de blanc arbitraire.
Une légende dit ce qu'il y a à voir (l'explication donnée dans le texte, et ainsi, pas de redondance)
Devant les intertitres, deux lignes de blanc, et une ligne derrière
Dernière phrase de chaque paragraphe, dire pourquoi on passe au paragraphe suivant (et pas seulement qu'on y passe)
En début de paragraphe, dire ce qu'il y aura dans le paragraphe.
Des points à la fin des légendes de figures et de tableaux.

Ce ne sont là que des fautes statistiquement courantes. Bien d'autre sont signalées dans les Difficultés de la langue française, qu'il n'est pas inutile de (re)lire.

Plus généralement, celui qui écrit devrait avoir quatre outils : un ordinateur équipé d'un traitement de texte avec correction orthographique, un dictionnaire (pour le vocabulaire, les Difficultés de la langue française (pour la grammaire), le Gradus (pour la rhétorique)

Signature pour des questions de propriétés intellectuelle

Explication

Ici, c'est seulement un entraînement, car c'est en réalité le cahier de laboratoire qui doit être signé et contresigné, à chaque page (est-ce fait ?).

Notes
académiques
de
l'Académie
d'agriculture
de
France



ACADÉMIE
d'AGRICULTURE
de FRANCE

AGRICULTURE ■ ALIMENTATION ■ ENVIRONNEMENT