

Avant-propos

Les statistiques : des outils indispensables à considérer avec rigueur

« Ne pas interpréter ce qu'on ne comprend pas...
exiger la compréhension des méthodes, des tenants
et des aboutissants avant de donner du sens
aux conclusions. »

Nicolas Gauvrit,
Statistiques, méfiez-vous ! (2014)

Au XIX^e siècle, le Premier ministre britannique, Benjamin Disraeli, définissait trois sortes de mensonges : « les petits mensonges, les sacrés mensonges et les statistiques », soulignant déjà la controverse autour de ces outils. Au sein de la communauté scientifique, les pro- et anti-statistiques s'affrontent et cela se manifeste par des disciplines encore réticentes à leur utilisation. De nombreux médias utilisent d'ailleurs les statistiques pour endormir l'opinion publique et avancer des résultats qui n'ont au final aucun sens sans certaines précisions préalables.

Plus récemment, dans l'article publié dans *Le Monde* le 4 octobre 2017, « Publier ou périr : la Science poussée à la faute », les journalistes soulignent le [mésusage des statistiques](#) comme l'une des mauvaises pratiques en recherche dans la course à la publication. Ces mésusages sont liés à une mauvaise compréhension du fonctionnement de cet outil avec des échantillonnages biaisés, des expérimentations simplistes limitant la reproductibilité, des résultats exagérés quant à la population statistique utilisée ou la significativité, ou encore la sous-estimation des risques d'erreur associés aux tests statistiques.

Malgré ces critiques, il apparaît clairement qu'à partir du moment où ces outils commencent à être utilisés au sein d'une discipline scientifique ils deviennent vite

incontournables. L'utilisation des statistiques est en effet le seul moyen de généraliser les résultats issus d'échantillons à l'échelle des populations du fait des problèmes liés aux fluctuations d'échantillonnage et la variabilité inhérente aux objets « naturels ». Toutefois, elle peut conduire sans aucun doute à des résultats biaisés à partir du moment où elles ne sont pas réalisées avec rigueur.

Les statistiques nécessitent en quelque sorte une « calibration ». Il ne viendrait pas en tête à un biogéochimiste d'utiliser une sonde à oxygène sans l'avoir préalablement calibrée en fonction de paramètres environnementaux tels que la température, ou à un écologue systématicien d'identifier des organismes à l'espèce sans utiliser des clés de détermination rigoureuses et reconnues par les spécialistes. La « calibration » d'outils statistiques se matérialise par la vérification de conditions d'application des tests engagés pour répondre à un objectif précis (par exemple comparaison de moyennes de population, existence de tendance...). Ces tests se basent sur l'utilisation d'équations mathématiques posées selon certaines hypothèses. Ne pas respecter ces hypothèses rend bancale l'application des équations utilisées dans ce test de par les propriétés mathématiques utilisées pour sa conception.

Ainsi, ces outils sont indispensables à une approche scientifique objective mais leur utilisation nécessite d'être particulièrement rigoureuse quant à leur mise en place et leurs interprétations. L'objectif de ce livre est donc d'appréhender l'utilisation des statistiques en explicitant l'esprit relatif à leurs conceptions, de présenter les analyses les plus utilisées en sciences environnementales, leurs principes, leurs avantages et inconvénients, leur mise en place *via* le logiciel R et leurs interprétations dans le domaine des sciences environnementales.

I.1. Pourquoi des analyses statistiques en sciences environnementales ?

I.1.1. La variabilité intrinsèque aux objets « naturels »

Les objets « artificiels », issus d'une fabrication industrielle, par exemple des madeleines de la marque Bijou, se caractérisent par des caractéristiques propres, conformes à un cahier des charges précis : c'est-à-dire poids, taille, apports caloriques, teneur en glucides... Cette calibration est particulièrement surveillée au cours de la chaîne de production et tout écart à la norme imposée entraîne le retrait de l'objet de la vente. Ainsi la pesée d'un « échantillon » de 1 000 madeleines (marque Bijou) montre, par exemple, de très faibles fluctuations du poids – entre 24,85 et 25,19 grammes (figure I.1).

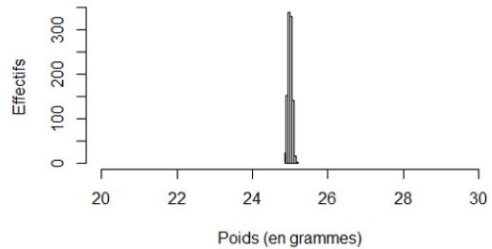
Par opposition, les objets « naturels », vivants ou non, sont marqués par une forte variabilité interindividuelle pour une espèce donnée, ou bien entre prélèvements hydrologiques ou pédologiques pour, respectivement, une masse d'eau ou un sol théoriquement homogène. Ainsi, bien que classé par calibre selon leur poids, un échantillon de 1 000 huîtres de calibre 5 correspondant à une même classe d'âge montre une courbe de distribution assez large avec une moyenne de 37 g et une gamme de variation fluctuant essentiellement entre 30 et 45 g (figure I.1).

Cette forte variabilité est inhérente aux objets « naturels » et les distingue des objets « artificiels ».

1. Cette introduction est une vision simplifiée et synthétique des livres de Scherrer (1984) et de livres en ligne tel que celui de Poinot (2004).



Madeleines – marque Bijou



Huîtres – calibre 5

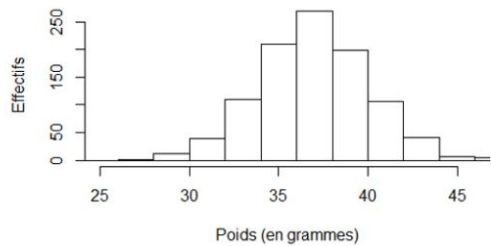


Figure I.1. Distribution du poids pour 1 000 madeleines de la marque Bijou, fabriquées de manière industrielle, et de 1 000 individus d'un objet « naturel » vivant, l'huître creuse (calibre 5)

Cette variabilité intrinsèque impose la considération de plusieurs éléments/individus pour caractériser un objet « naturel », appelés **réplicas**. Le nombre d'éléments à considérer sera bien entendu d'autant plus grand que la variabilité est forte afin d'appréhender au mieux les caractéristiques de l'objet considéré.

I.1.2. Décrire une population naturelle

Soit une population d'huîtres présente dans le bassin d'Arcachon (Sud-Ouest de la France) dont le nombre s'élèverait à 30 au total. Il est simple de déterminer pour chacune d'elle son infestation par un ver parasite *Polydora* spp. (figure I.2). Si le nombre d'huîtres parasitées est de 12 au total, la prévalence parasitaire réelle (c'est-à-dire proportion d'huîtres infestées) est donc de 40 % à l'échelle du bassin.

Il est toutefois complètement utopique d'envisager une analyse exhaustive de la population d'huîtres pour un environnement donné. En effet, le nombre d'individus est souvent beaucoup plus élevé et faire un recensement total serait très

chronophage. En outre, l'étude du parasitisme des huîtres implique la dissection et donc l'euthanasie des hôtes (comme la plupart des études conduites sur les êtres vivants) et il est totalement inacceptable de décimer une population sous prétexte de recherches scientifiques. L'analyse d'une population naturelle, vivante ou non (par exemple d'huîtres, de masses d'eau), passera donc par un échantillonnage représentatif : seulement quelques éléments seront prélevés mais de manière à **représenter la composition et la complexité de la population dans son entier**.

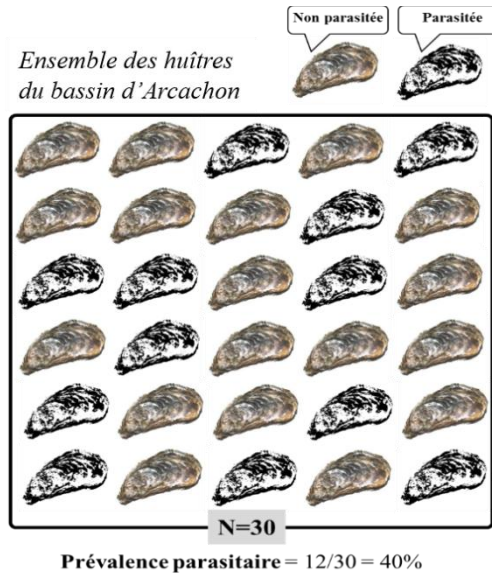


Figure I.2. Exemple factice 1 : toutes les huîtres du bassin d'Arcachon ont été dénombrées ($N=30$ en tout) et analysées ; il est possible d'accéder à la vraie valeur de prévalence parasitaire par le vers *Polydora*, ici 40 %

Soit la prévalence obtenue à partir d'un premier échantillon de 8 huîtres réalisé dans le bassin d'Arcachon. Celle-ci est de 25 % (2 huîtres infestées sur 8 ; échantillon 1, figure I.3). Cette valeur est différente de celle obtenue à partir de la population dans son entièreté (40 %) du fait des fluctuations de l'échantillonnage (c'est-à-dire seulement 8 huîtres considérées sur les 30). En outre, la considération d'un second échantillon sur cette même population donne une prévalence de 50 % (4 huîtres infestées sur 8 ; échantillon 2, figure I.3). Cette valeur est non seulement différente de la valeur obtenue à l'échelle de la population mais encore de celle de l'échantillon 1. Ainsi, **deux échantillons donnant des valeurs différentes peuvent provenir d'une même population de départ**.

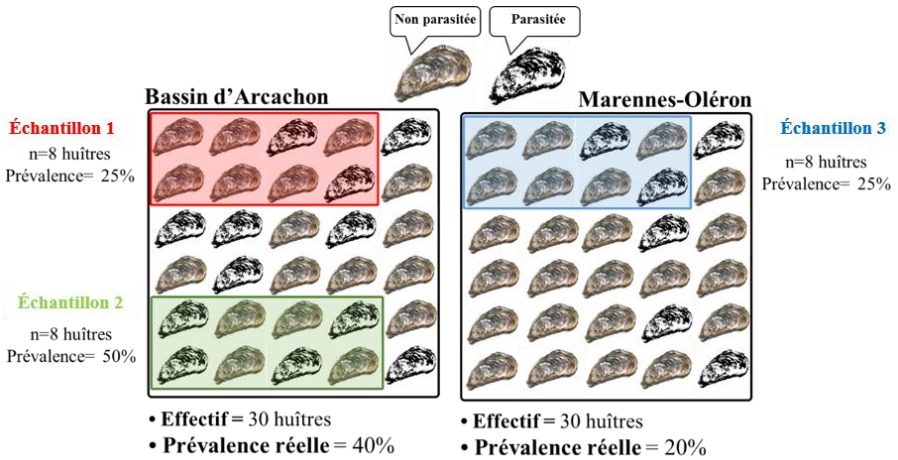


Figure I.3. Comparaison de deux populations factices d'huîtres, géographiquement distinctes (bassin d'Arcachon et Marennes-Oléron). Les effectifs totaux sont de 30 individus pour chaque population mais les prévalences réelles sont distinctes, 40 % et 20 % respectivement. Trois échantillons ont été réalisés, deux au sein de la population arcachonnaise et un dans le bassin de Marennes-Oléron.

Soit désormais la comparaison de la prévalence parasitaire de 2 populations d'huîtres entre 2 bassins ostréicoles réputés, le bassin d'Arcachon et le bassin de Marennes-Oléron, composées pour chacune de 30 individus au total (figure I.3). Les prévalences réelles sont de 40 % pour Arcachon et 20 % pour Marennes-Oléron. Un échantillon réalisé au sein de la population du bassin de Marennes-Oléron donne une prévalence de 25 % non seulement différente de la prévalence réelle du système mais encore identique à celle de l'échantillon 1 du bassin d'Arcachon (figure I.3). Ainsi, deux échantillons provenant de deux populations différentes peuvent donner des résultats identiques.

En conclusion, le fait de passer par des échantillons ne donne pas les valeurs justes et complexifie ainsi la généralisation que nous pourrions faire à l'échelle des populations à partir de ces échantillons.

Bien que le passage par un échantillonnage soit obligatoire en sciences environnementales du fait de la variabilité inhérente à tout objet « naturel », la différence observée entre deux échantillons issus de deux populations à comparer peut-être liée à 1) une différence « réelle » entre ces 2 populations et 2) en partie, aux fluctuations

de l'échantillonnage. La part respective de l'une ou de l'autre, effet réel *versus* effet aléatoire, est impossible à quantifier car la valeur de la variable considérée à l'échelle de la population entière n'est pas accessible. Seul l'outil « statistiques » permettra de faire la part des choses et d'évaluer le risque de se tromper quant à la décision de considérer que ces 2 populations sont différentes ou non (figure I.4).

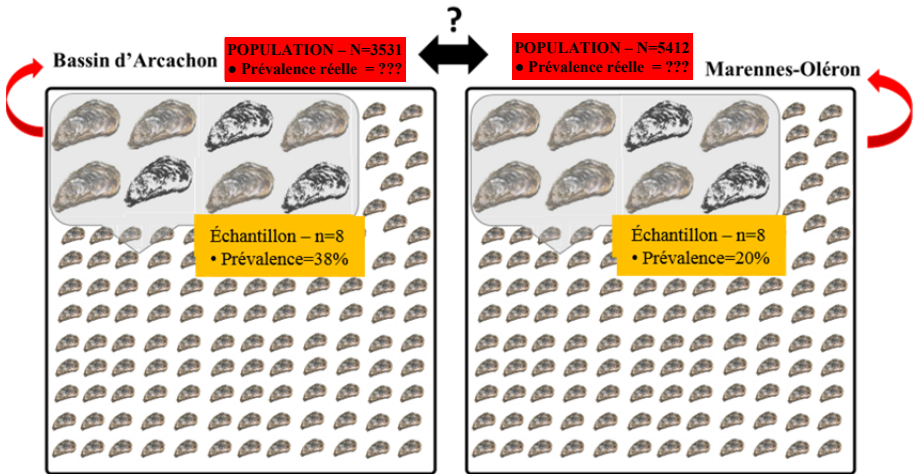


Figure I.4. Comparaison de 2 populations factices d'huîtres, géographiquement distinctes (bassin d'Arcachon et Marennes-Oléron). Seules les statistiques permettront d'évaluer le risque de se tromper quant à la décision de considérer que ces 2 populations sont différentes en généralisant proprement les résultats issus de la considération des échantillons réalisés au sein de chaque population.

Ainsi, les statistiques désignent l'ensemble des méthodes scientifiques à partir desquelles les données sont recueillies, organisées, résumées, présentées et analysées, et qui permettent de tirer des conclusions et de prendre des décisions judicieuses à propos des populations qu'elles représentent.

I.2. L'esprit statistique : de l'échantillon représentatif à la population

De manière générale, la démarche scientifique consiste à prélever un (ou des) échantillon(s), le(s) décrire et « extrapoler » les résultats obtenus à la (aux) population(s) par une approche statistique. Le ou les échantillons se doivent donc d'être représentatifs de la population.

1.2.1. La représentativité d'un échantillon

Un échantillonnage représentatif doit traduire au mieux la composition et la complexité de la population dans son entier. Il s'agit donc de donner autant de chance à chaque élément de la population d'être prélevé. Seul un échantillonnage réalisé au hasard dans la population, c'est-à-dire un échantillonnage aléatoire, permet cela. Toutefois, au hasard ne signifie pas n'importe comment et l'encadré I.1 démontre qu'un esprit humain est trop sophistiqué pour aborder le chaos convenablement.

Même si cela peut paraître étonnant, seule une méthodologie rigoureuse peut permettre d'accéder à un échantillonnage aléatoire. Soit à nouveau la population d'huîtres dans le bassin d'Arcachon avec cette fois un nombre d'individus vraisemblable ($N=8\ 000$). En théorie, tous les éléments de la population devraient être recensés et numérotés de 1 à 8 000 (figure I.5). Si l'échantillon est constitué de 8 éléments, 8 numéros devraient être tirés au sort (par un ordinateur ou à l'aide d'une table de chiffres aléatoires) et seules les huîtres correspondant à ces numéros considérés dans l'échantillon (figure I.5).

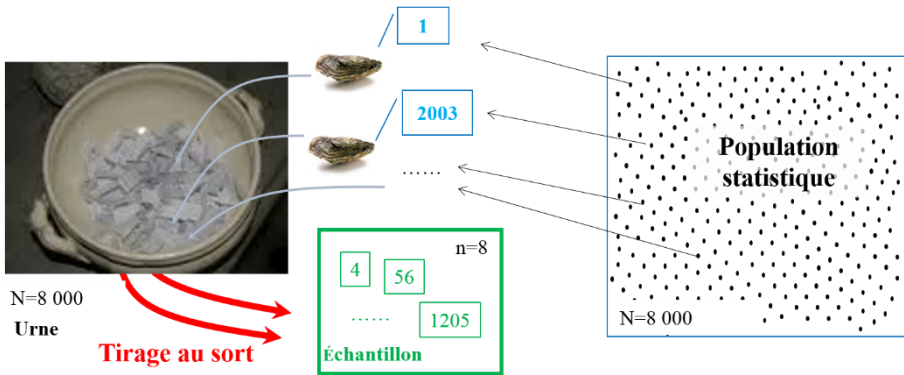
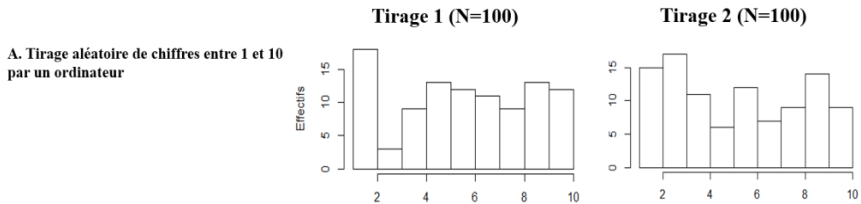


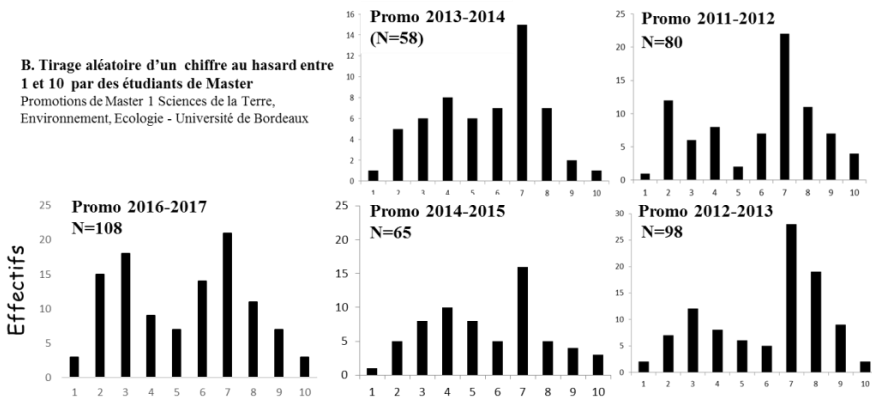
Figure I.5. Procédure rigoureuse d'un échantillonnage aléatoire simple de 8 huîtres dans une population de 8 000 individus

Il s'agit d'un échantillonnage aléatoire simple mais le seul sur lequel les tests statistiques à disposition dans la littérature peuvent être appliqués tels quels. D'autres types existent permettant notamment de prendre en compte un facteur de variation spatial ou temporel connu pour jouer sur la variabilité des éléments (voir chapitre 3).

L'exercice² consiste à tirer au sort (au hasard) un chiffre entre 1 et 10. Si la tâche est confiée à un ordinateur pour, par exemple, 2 tirages de 100 individus (A), le chiffre sortant majoritairement ou minoritairement ne sera pas forcément le même et la forme de la distribution finale ne sera pas identique d'un tirage à l'autre.



Ce même exercice réalisé de manière répétitive d'une année sur l'autre pour des étudiants de master montre des distributions similaires avec un chiffre 7 souvent majoritaire et une forme bimodale avec des valeurs extrêmes (1 et 10) souvent minoritaires.



Cet exercice démontre que malgré l'effort réalisé pour donner un chiffre au hasard, *l'esprit humain est souvent influencé par sa raison ou sa culture*. Le chiffre 7 ayant une signification symbolique forte dans le monde occidental et les chiffres 1, 5 ou 10 boudés car non représentatifs d'un chiffre donné au hasard au regard de l'esprit (trop extrême ou trop médian). Ainsi, Par opposition, un tirage aléatoire réalisé par un ordinateur sera plus arbitraire.

Encadré I.1. Aparté sur l'échantillonnage aléatoire et l'esprit humain

2. Cet exercice est inspiré du livre de Poinso (2004), *Statistiques pour statophobes*, disponible en ligne à l'adresse : https://perso.univ-rennes1.fr/denis.poinso/statistiques_%20pour_statophobes/STATISTIQUES%20POUR%20STATOPHOBES.pdf.

1.2.2. Comment caractériser l'échantillon pour une bonne extrapolation à la population

Certaines caractéristiques de l'échantillon vont permettre d'obtenir/extrapoler les propriétés de la population. Bien que la moyenne soit le premier paramètre venant à l'esprit pour résumer l'échantillon, elle ne suffit pas.

Afin de le démontrer, mettons-nous dans la peau d'un ostréiculteur arcachonnais qui vient de perdre une grosse partie de sa production suite au développement d'un pathogène. Il décide d'aller puiser dans les récifs d'huîtres sauvages du bassin pour assurer l'approvisionnement de son stand sur le marché de Noël d'Arcachon. Cela lui assurera une rentrée d'argent, certes moindre qu'avec des huîtres cultivées (prix à la douzaine plus faible) mais lui permettra de limiter les dégâts d'un point de vue économique pour son entreprise.

Il recherche en priorité des huîtres de calibre 5, soit d'un poids d'environ 37 g (30 à 45 g), particulièrement touchées par le pathogène sur sa production personnelle. Afin de faciliter son travail, il s'adresse au Comité régional de la conchyliculture (CRC) pour avoir une idée des poids moyens des huîtres sauvages en différents endroits du bassin et ainsi cibler ses prélèvements. Justement, le poids moyen des huîtres a été récemment évalué sur 3 sites du bassin, le Cap Ferret (en moyenne 37 g), Comprian (36 g) et Jacquets (45 g). Il écarte alors le site du Jacquets présentant visiblement des huîtres trop grosses et décide finalement de prélever au Cap Ferret pour des raisons d'accessibilité aux récifs. Après des heures de détrockage, les mains en sang, il n'a pu récolter qu'une trentaine d'huîtres de calibre 5. Il revient furieux vers la CRC qui lui montre alors les résultats graphiques des campagnes réalisées pour ces 3 sites. Le poids moyen des huîtres avait en effet été évalué sur une base de 100 huîtres pour chaque site, les moyennes sont effectivement justes mais l'ostréiculteur se mord alors les doigts (déjà bien amochés !) suite à l'observation des courbes de distribution des poids obtenus par site (figure I.6).

Il apparaît clairement sur les courbes relatives au Cap Ferret ou Comprian que les huîtres sauvages présentent des poids moyens très proches mais une structure de poids très différente. L'essentiel de la population présente un poids proche du poids moyen de 36 g à Comprian et correspond à des huîtres de calibre 5 alors que la population du Cap Ferret présente 2 cohortes de tailles pour l'une inférieure et l'autre supérieure au poids moyen : peu d'huîtres présentent finalement les caractéristiques du calibre désiré par l'ostréiculteur à cette station. Paradoxalement, l'ostréiculteur aurait pu ramasser beaucoup plus d'huîtres de calibre 5 à effort d'échantillonnage comparable à Jacquets, bien que la moyenne générale soit plus élevée.

Ainsi, cet exemple illustre que *la* description d'un échantillon par sa seule moyenne n'est pas suffisante. Elle nécessite la considération d'un paramètre traduisant la **variabilité interindividuelle**. Cette variabilité sera abordée en statistiques par des **paramètres dits de dispersion** tels que la variance, l'écart-type, l'erreur-standard... En outre, la moyenne n'est pas le seul paramètre décrivant une valeur centrale d'une population bien que majoritairement utilisée. Des paramètres comme la médiane ou le mode peuvent parfois être plus appropriés (voir section 2.2.1).

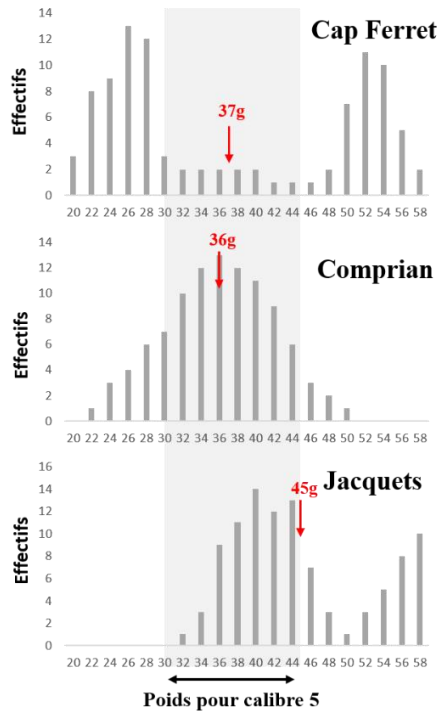


Figure 1.6. Courbe de distribution des poids des huîtres sauvages prélevées au Cap Ferret, à Compiègne et à Jacquets par le Comité régional de la conchyliculture. Les moyennes calculées sont reportées en rouge. L'encadré gris correspond aux huîtres de calibre 5.

1.2.3. Effet de la taille de l'échantillon

Contrairement aux idées reçues, **la taille d'un échantillon n'influence pas sa représentativité** : ce n'est pas le nombre d'individus considéré qui va conditionner le fait que l'échantillon traduit la complexité de la population mais son type

d'échantillonnage. Comme décrit précédemment, seul un échantillonnage aléatoire permettra cette représentativité.

Soit la distribution de la population des huîtres à Compiègne. Celle-ci se présente sous la forme d'une courbe en cloche (courbe gaussienne) centrée sur une moyenne de 36 g avec une forte dispersion de poids entre 20 et 49 g (figure I.7).

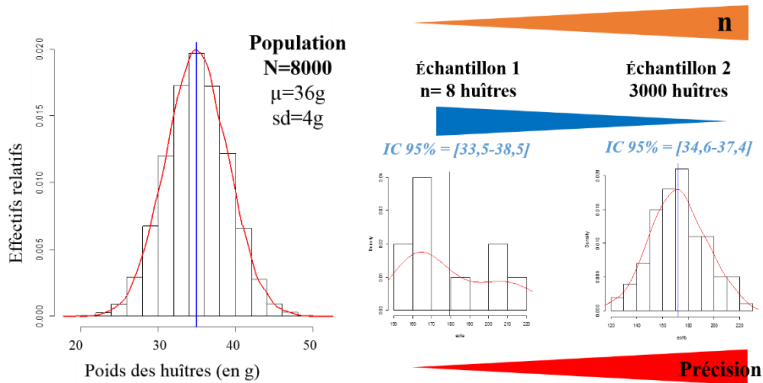


Figure I.7. Courbe de distribution des poids des huîtres sauvages à Compiègne pour la population entière (N=8 000 huîtres) et deux échantillons de n=8 huîtres et n=3 000 huîtres. Plus la taille de l'échantillon augmente, plus l'intervalle de confiance de la moyenne calculée à partir des paramètres caractéristiques de l'échantillon diminue.

Deux échantillons aléatoires de tailles différentes (échantillon 1 de 8 huîtres et échantillon 2 de 3 000 huîtres) ont été réalisés à partir de cette population. La valeur moyenne des échantillons a de fortes chances de ne pas être égale à la vraie moyenne de la population du fait des fluctuations de l'échantillonnage, mais nous verrons plus tard que les paramètres de dispersion (c'est-à-dire erreur standard) calculés à partir de ces échantillons permettent d'estimer un intervalle de confiance dans lequel il y a 95 % de chance que se situe la vraie moyenne de la population (voir section 2.3.1). Plus l'échantillon est grand, plus cet intervalle de confiance est petit et donc l'estimation de la « vraie » moyenne affinée. Pour le petit échantillon, la moyenne de la population est vraisemblablement entre 33,5 et 38,5 g, soit une variation de 5 g, alors que pour le grand échantillon cette gamme est presque réduite de moitié (2,8 g ; figure I.7). L'estimation sera donc plus précise pour un grand échantillon.

En sciences environnementales, le choix de la taille d'un échantillon (c'est-à-dire l'effort d'échantillonnage) correspondra au meilleur compromis entre faisabilité et puissance du test statistique mis en œuvre. Il ne s'agit pas en effet de passer trop de

temps à analyser l'échantillon ni de décimer une population. Cependant, l'échantillon doit être suffisamment grand pour que l'estimation faite soit la plus précise possible pour pouvoir conclure sur l'objectif posé. S'il s'agit par exemple de comparer 2 populations, plus les intervalles de confiance seront petits, plus il sera possible de déterminer que ceux-ci ne se chevauchent pas (ou très peu) et ainsi que les populations sont différentes si c'est le cas. La capacité d'un test statistique à déterminer s'il existe une différence entre 2 populations à partir d'échantillons est appelée « puissance du test » (voir section 4.3.1).

I.3. L'outil « statistique » dans la recherche environnementale

I.3.1. La recherche environnementale : du descriptif à l'explicatif

La recherche scientifique ne se cantonne pas à l'étude d'un seul paramètre dans le sens où le chercheur aura pour objectif non seulement de **décrire la variabilité spatiale et temporelle d'un paramètre d'intérêt** (par exemple la prévalence parasitaire de l'huître) mais également de **comprendre comment d'autres facteurs contrôlent ses fluctuations** (par exemple taille, indices de condition, contamination du site, cycle de vie du parasite, etc.). Ainsi, de nombreux paramètres annexes au paramètre d'intérêt seront prélevés simultanément lors d'une étude. Par exemple, chercher les facteurs environnementaux influant la prévalence parasitaire pourra se faire en analysant l'évolution conjointe de celle-ci avec les facteurs proposés par des graphiques et des analyses statistiques en considérant les paramètres deux à deux afin de déterminer si les relations sont « réelles » (on parlera alors de significativité).

Cependant, il est peu probable qu'un seul facteur agisse sur le paramètre d'intérêt. La prévalence parasitaire pourrait par exemple être d'autant plus forte que les huîtres sont âgées (durée plus longue de contact avec les parasites) et/ou que les huîtres soient affaiblies physiologiquement du fait de la présence d'un contaminant. Une approche globale considérant l'ensemble des paramètres potentiellement explicatifs devra donc être utilisée et l'esprit humain est trop limité pour l'appréhender à partir de la seule considération du tableau de données global.

Une analyse des paramètres deux à deux est non seulement chronophage mais encore biaisée par le jeu de variables « cachées » et de covariation entre facteurs explicatifs. Par exemple, une approche par paramètres deux à deux permettrait de mettre en évidence une relation entre prévalence et indices de condition, une autre entre prévalence et contamination, une autre entre taille et prévalence et une dernière entre contamination et indices de condition. Une approche statistique globale permettrait alors de hiérarchiser l'effet de ces facteurs en mettant en évidence par exemple que la relation avec la taille n'est pas le fait d'un contact prolongé avec le parasite mais plutôt un impact indirect du contaminant sur la physiologie de l'huître.

1.3.2. La place des statistiques dans la démarche scientifique

La démarche scientifique est comparable sur certains points à celle abordée dans une enquête criminelle. Prenons l'exemple d'enquêtes menées dans le cadre d'une série télévisée bien connue (figure I.8). Cette série débute toujours par une scène de crime sur laquelle l'équipe relève des indices et interroge des témoins. Les échantillons sont envoyés au laboratoire pour complément, les témoins ou suspects interrogés sur leurs alibis dans les locaux de la police puis l'ensemble des indices construits sont combinés pour constituer des preuves et conclure sur le meurtrier.

Comparativement, toute démarche scientifique débute par un échantillonnage sur le terrain pour relever des variables d'intérêt. Dans le cas par exemple d'une étude analysant l'effet des facteurs contrôlant l'état de santé des huîtres dans le bassin d'Arcachon, des variables traduisant l'état physiologique de l'espèce ainsi que d'autres caractérisant son environnement physico-chimique seraient relevées en différentes stations (température, salinité, contamination en métaux, etc.). Ces variables obtenues sur le terrain sont complétées par des analyses en laboratoire (par exemple dosage des métaux) couplées ou non à une expérimentation (par exemple pour déterminer l'impact spécifique du contaminant cuivre sur la survie des huîtres). Enfin, l'ensemble des données est traité pour répondre aux objectifs posés. La démarche globale « terrain - laboratoire - analyse » est donc semblable à une enquête policière avec des variables mesurées sur le terrain ou en laboratoire similaires aux « indices » relevés lors d'une enquête criminelle et le traitement des données récoltées comparables à la réflexion des enquêteurs autour de preuves.

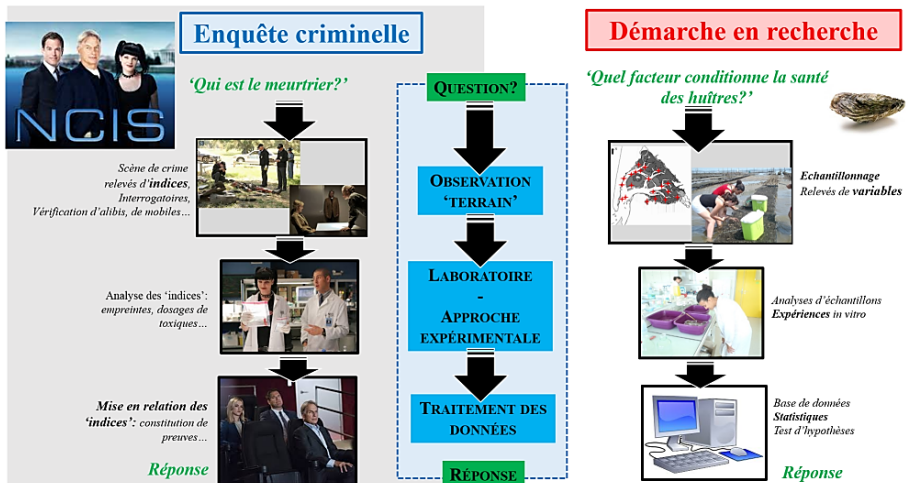


Figure I.8. Comparatif de la démarche scientifique aux enquêtes criminelles

La différence fondamentale réside toutefois dans le fait que les enquêteurs se doivent de prospecter toutes les pistes possibles alors que les scientifiques ne peuvent accéder à la population entière et auront donc recours aux statistiques pour pallier ce manque. Les plans d'échantillonnage ou plans d'expérimentaux devront pouvoir généraliser les résultats à la population ciblée et prendre en compte les connaissances acquises par la littérature sur le sujet d'étude (voir chapitre 3). Par exemple, les stations échantillonnées sur le terrain pourraient être choisies aléatoirement au sein de zones ostréicoles connues.

La démarche scientifique se divise donc en 3 étapes (figure I.9) :

- 1) le terrain avec une stratégie d'échantillonnage représentatif de la population permettant de mettre en avant les relations entre variables ;
- 2) le laboratoire pour analyser certaines variables ou approcher expérimentalement certains liens de causalité entre variables ;
- 3) une modélisation pour confronter les relations observées sur le terrain à celles obtenues par expérimentation et ainsi mieux comprendre ces relations.

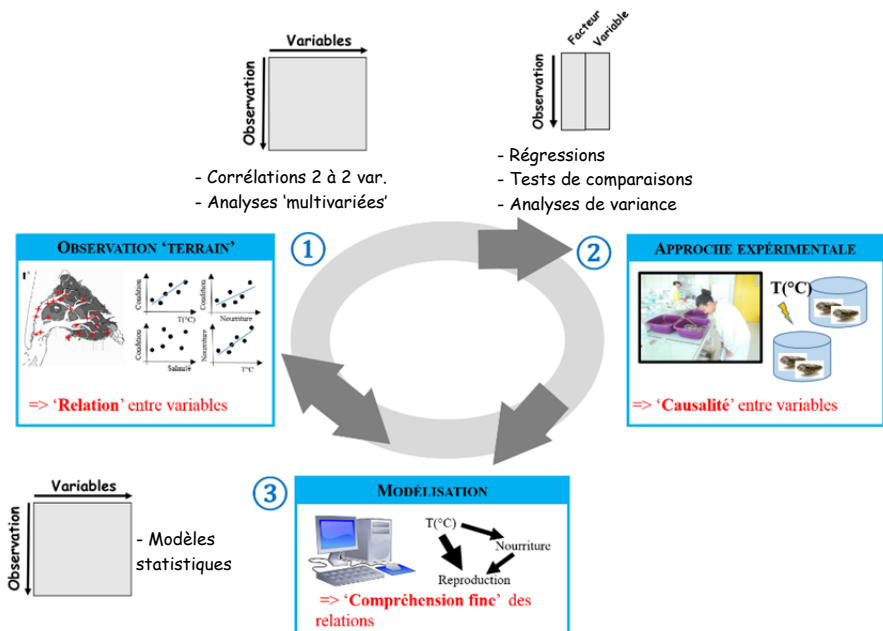


Figure I.9. La complémentarité des approches en recherche

1.3.3. L'importance des conditions d'application et de la stratégie statistique

Les tests statistiques se basent sur l'utilisation d'équations mathématiques dont les propriétés sont posées selon certaines hypothèses. Ces hypothèses doivent donc être vérifiées : il s'agit des conditions d'application. Si la réalisation d'un test est conditionnée par exemple par le fait que les données suivent une loi de distribution connue, par exemple la loi normale (voir chapitre 2), le non-respect de cette condition rend bancal l'application des équations utilisées dans ce test de par les propriétés mathématiques utilisées pour sa conception.

En outre, l'objectif scientifique impose une stratégie statistique dont dépend le plan d'échantillonnage ou le plan expérimental. Bien que l'outil statistique n'intervienne qu'à la fin de la démarche scientifique, il doit être réfléchi en amont pour guider les choix et les analyses numériques : nombre de répliques, stratégie d'échantillonnage, approches expérimentales. Les tests statistiques classiques développés dans les manuels sont conçus pour une stratégie d'échantillonnage aléatoire simple. Toute autre stratégie nécessite une adaptation des tests (voir chapitre 3).

C'est une erreur de penser que les statistiques n'interviennent que pendant la phase de traitement de données. En effet, pour que cette dernière soit efficace, certains choix doivent être réalisés en amont, dès la conception du plan d'échantillonnage ou expérimental que ce soit dans le type de démarche, le choix des variables, le nombre de répliques... Il est en effet frustrant de se dire que l'objectif aurait pu être mieux appréhendé « si... » après analyse (figure I.10). Toutes les étapes de la démarche scientifique sont interconnectées de par le choix des tests statistiques qui seront utilisés au final. Il faudrait en théorie connaître déjà le type de test qui sera mis en place dès la réflexion sur l'objectif d'étude.

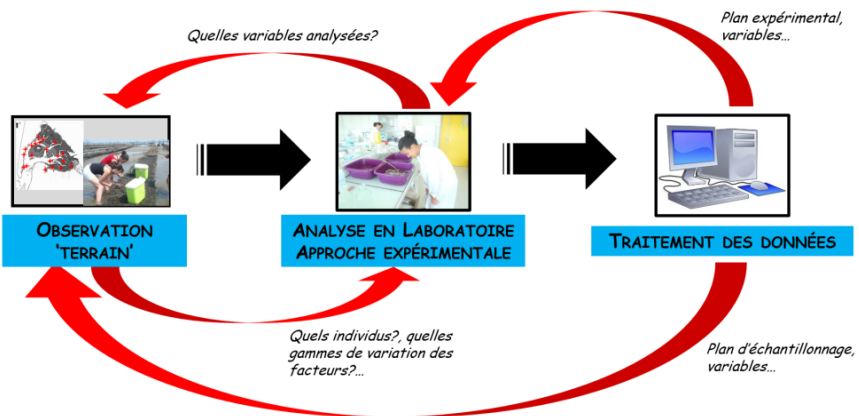


Figure I.10. Des approches successives/interconnectées par les « choix » réalisés tout au long de la démarche scientifique

I.4. Organisation de l'ouvrage

Les statistiques présentées dans cet ouvrage sont celles qui sont les plus usitées dans le domaine des sciences environnementales pour comparer des paramètres, réaliser des modèles linéaires d'une variable Y à expliquer par une ou plusieurs variables explicatives avec des tests paramétriques ou non paramétriques. Leurs descriptions sont faites au travers d'exemples concrets en sciences environnementales. Elles sont présentées *via* l'utilisation du logiciel R, très utilisé dans le monde scientifique. Cet ouvrage est composé comme suit :

- le chapitre 1 introduit l'utilisation du logiciel R avec quelques recommandations pour l'utiliser correctement, les opérations de base, l'importation de données, la conception de tableaux croisés dynamiques et de graphiques ;

- le chapitre 2 présente les notions fondamentales en statistiques : le vocabulaire de base, comment résumer un échantillon avec les paramètres de tendance centrale et de dispersion ainsi que les principales lois de probabilité sur lesquelles se basent les tests statistiques ;

- le chapitre 3 décrit la conception de plans d'échantillonnage et de plans expérimentaux en fonction des objectifs et des hypothèses posées en amont de l'étude ;

- le chapitre 4 introduit les grands principes des tests statistiques avec notamment la théorie de la décision et la démarche globale adoptée *via* l'exemple des tests les plus classiques ;

- le chapitre 5 propose des clés de choix des tests statistiques selon l'objectif et les données disponibles ainsi que les outils statistiques utiles à tester les conditions d'application de ces tests ;

- le chapitre 6 présente les tests de comparaison de paramètres présentant des alternatives bilatérales ou unilatérales comme 2 moyennes, 2 ou plusieurs distributions ou proportions, etc. ;

- le chapitre 7 s'intéresse aux modèles linéaires classiques et généralisés décrivant une variable Y quantitative en proposant des équations à partir de plusieurs autres variables explicatives avec leurs principes, leurs conditions d'application et différents exemples d'application selon le plan considéré ;

- le chapitre 8 décrit les alternatives à ces modèles linéaires dans le cas de conditions non respectées, alternatives basées sur les rangs ou sur des tests par permutation ;

- la conclusion décrit notamment comment introduire les statistiques dans un rapport ou une publication scientifique.

