

Le métier de métrologue

ÉVALUER L'INCERTITUDE DE MESURE ET SES APPLICATIONS

L'article du trimestre dernier abordait un thème organisationnel, celui de la sous-traitance. Aujourd'hui le sujet traité sera plus technique puisqu'il s'agit de l'évaluation de l'incertitude de mesure et de ses applications. L'article rappellera tout d'abord ce qu'est l'incertitude de mesure pour ensuite résumer la méthode la plus employée au sein de la communauté des métrologues pour réaliser les calculs : le GUM⁽¹⁾ (NF ISO/CEI Guide 98-3). Pour finir, les principaux usages de l'incertitude seront exposés.

Rappel sur le sens

L'incertitude de mesure est une valeur qui va quantifier la confiance que l'on peut accorder à un résultat de mesure. C'est un intervalle au sein duquel la valeur recherchée a une forte probabilité de se trouver. Sans incertitude, un résultat n'a que peu de sens. Il ne permet pas d'être comparé à un autre ou à une valeur de référence.

L'incertitude fait peur...

Dans l'industrie, rares sont les entreprises à exprimer des résultats de mesure avec des incertitudes. Pour certains industriels, exprimer l'incertitude revient à affirmer que l'entreprise n'est pas sûre d'elle, qu'elle ne détient pas « la mesure vraie », qu'elle peut être remise en cause. L'incertitude est une notion complexe à intégrer, on peut la résumer ainsi : « la mesure lue avec mes yeux n'est pas vraie, la vérité est ailleurs... Probablement quelque part au sein de la zone nommée incertitude ».

RETOUR À L'ÉCOLE

Nous avons tous appris à l'école qu'un résultat de mesure sans unité n'avait pas de sens, il ne viendrait à personne d'écrire ce résultat sans l'unité par exemple : « le sachet pèse 2,3 ».

Même si la masse du sachet est exprimée ainsi : 2,34 g cette valeur n'a que peu de sens dans le cadre d'une utilisation rigoureuse. Il faudrait lui associer son incertitude : la masse du sachet est de 2,3 g ± 0,12 g [95%].

LES EXPERTS



Jean-Michel POU

Président fondateur de la société Delta Mu, membre des commissions "Métrologie" et "Méthodes statistiques" de l'Afnor et président du cluster d'excellence "Auvergne Efficience Industrielle".



Frédéric AUTHOUART

Métrologue, coach et fondateur de l'entreprise Crisalis qui allie résolution technique et humaine d'une problématique

Cette affirmation est toujours vraie même si l'afficheur est numérique et que le résultat est annoncé avec 5 chiffres après la virgule.

L'incertitude vient donc réveiller chez l'homme de nombreuses peurs, notamment celles de ne pas maîtriser, de ne pas tout contrôler.

Pour ceux qui cherchent à traverser leurs peurs et à inscrire un chiffre de confiance à côté de leurs résultats de mesure, ces derniers peuvent se retrouver vite décourager devant l'énergie qu'il faut dépenser pour calculer cette incertitude :

- compréhension de la méthode de

calcul qui peut paraître complexe ;
- réalisation d'un calcul qui demande du temps, car il faut traquer et évaluer les grandeurs perturbatrices de la mesure.

Et s'ils arrivent au bout de leurs efforts et annoncent un chiffre d'incertitude, ces personnes pourront toujours s'interroger sur la confiance que l'on peut porter à ce chiffre. Autrement dit : il y a de l'incertitude sur l'incertitude, difficile à entendre lorsque l'on cherche à se rassurer.

Ces freins expliquent pourquoi les résultats de mesure ou d'étalonnage ne sont pas souvent associés à une incertitude. Hormis quelques entreprises qui ont une démarche volontaire, celles qui associent une incertitude à leurs résultats sont celles pour lesquelles la norme ou la

(1) GUM : Guide to the expression of uncertainty in measurement, NF ISO/CEI Guide 98-3 : Incertitude de mesure — Partie 3 : Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure.

réglementation l'exigent : accréditation⁽²⁾, quantification des rejets de CO₂ à l'atmosphère⁽³⁾, métrologie légale.

La méthode GUM

Pour calculer cet intervalle de confiance autour du résultat exprimé, il faut une méthode. Pour être utilisée, cette méthode doit être universelle, à l'image de la définition des unités du S.I.⁽⁴⁾.

C'est durant les années 1980 qu'un groupe de travail constitué par le BIPM⁽⁵⁾ se mit à la tâche pour donner naissance en 1995 au guide pour l'évaluation des incertitudes de mesure, le GUM.

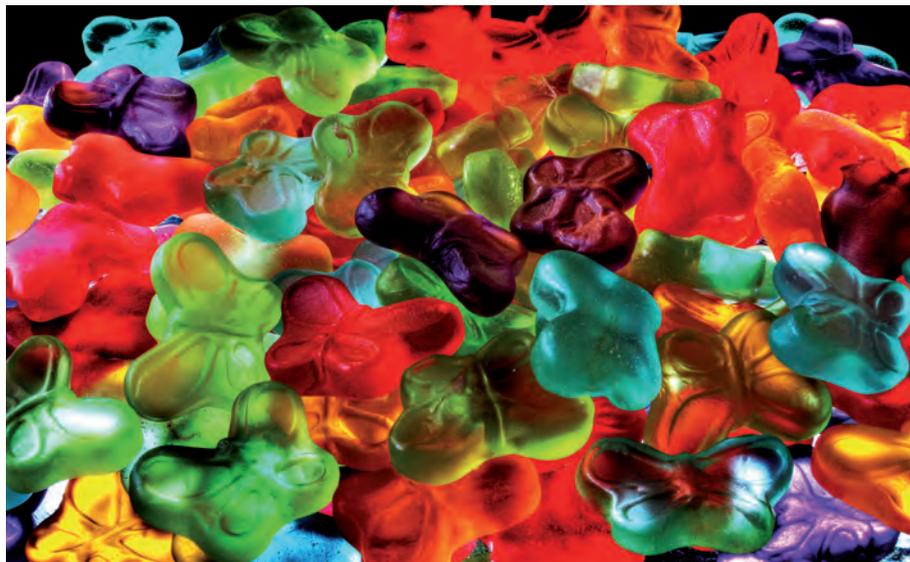
Le GUM est aujourd'hui la norme de référence pour les calculs d'incertitude. Elle est partagée internationalement aussi bien en métrologie industrielle qu'en métrologie légale. Elle est citée dans la plupart des normes d'accréditation ou de certification comme méthode de référence. Pour être réalisée, la méthode demande de la rigueur, une modélisation mathématique du processus de mesure et une bonne connaissance de ce dernier.

Une incertitude, mais pour faire quoi ?

Disposer d'une incertitude sur un résultat de mesure contribue à lui donner du sens, à quantifier la confiance que l'on peut porter à ce résultat de mesure.

Pour comparer

Dans le domaine de l'étalonnage : les laboratoires qui les réalisent peuvent être accrédités. Comment comparer deux



Nous avons tous appris à l'école qu'un résultat s'exprimait avec des unités. Mon paquet de bonbons ne pèse pas 100, mais 100 g. Mais il faudrait aussi lui associer son incertitude : la masse du paquet de bonbons est de $100 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ [95 %].

laboratoires accrédités ? Par leurs tarifs ? Leurs lieux géographiques ? Les délais de prestations ?

Ces critères peuvent être séduisants pour un service achat, mais moins pour un demandeur. L'incertitude permet de comparer ces deux entreprises sur le plan technique. En effet, il sera tout à fait possible de trouver une entreprise X avec une incertitude de $\pm 0,05^\circ\text{C}$ et une entreprise Y à $\pm 0,2^\circ\text{C}$ pour le même domaine d'étalonnage en thermométrie. Naturellement l'entreprise X sera plus coûteuse que l'entreprise Y, car les moyens développés y seront plus performants. En métrologie, il y a une justice, plus on cherche à se rapprocher de la mesure vraie, plus cela se paye.

Dans le domaine des échanges commerciaux : lorsqu'une comparaison de mesures a lieu entre le chiffre d'un vendeur et celui d'un acheteur, si ces derniers ne sont pas égaux alors un conflit peut naître. Comment le résoudre ? L'incertitude de mesure peut répondre en partie à ce problème.

Par exemple, un vendeur (V) annonce une vente de 498 tonnes d'hydrocarbures et un acheteur (A) en vérifiant la cargaison trouve 500 tonnes. À première vue, cet écart peut être problématique, mais si l'incertitude de mesure du vendeur est de $\pm 0,1 \%$ de la mesure et celui de l'acheteur

(2) Norme ISO/CEI 17025 : Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais

(2) Norme NF EN ISO/CEI 17020 : Exigences pour le fonctionnement de différents types d'organismes procédant à l'inspection

(2) Norme NF EN ISO 15189 : Laboratoires de biologie médicale — Exigences concernant la qualité et la compétence

(3) Règlement (UE) n° 601/2012 du 21/06/12 relatif à la surveillance et à la déclaration des émissions de gaz à effet de serre au titre de la directive 2003/87/CE du Parlement européen et du Conseil

(4) S.I. Système International des unités

(5) BIPM : Bureau International des Poids et Mesure.

NF ISO 5725 : UNE MÉTHODE ALTERNATIVE

Il existe une méthode alternative au GUM : la norme NF ISO 5725⁽⁶⁾. Ce document propose d'évaluer l'incertitude de mesure par une méthode pratique, c'est à dire par l'observation de la variation du résultat de mesure lorsque l'utilisateur fait varier une ou plusieurs grandeurs d'influences.

Cette norme est tout à fait pertinente, mais demande du temps et des moyens pour être mise en œuvre, elle est donc souvent réservée à quelques cas (essais laboratoires, modèle de mesure ne pouvant être traité par la méthode GUM).

(6) NF ISO 5725-1 (toutes les parties), Application de la statistique. Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure.

± 0,5 % de la mesure alors il n'y a pas de conflit. Tous les deux voient en réalité la même quantité. Par contre si l'acheteur avait trouvé 495 tonnes par exemple, une enquête pouvait être ouverte, car l'écart était supérieur à l'incertitude.

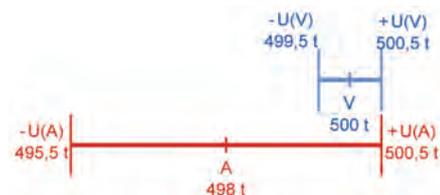


Illustration graphique des deux mesurages associés à leurs incertitudes.

Naturellement pour ces deux exemples, il est capital de réaliser un calcul d'incertitude suivant la même méthode et en ayant intégré les influences majeures. Un audit des deux systèmes de comptage d'hydrocarbure et un examen des calculs d'incertitude associés feront partie des actions à réaliser avant de conclure sur l'issue de ce litige.

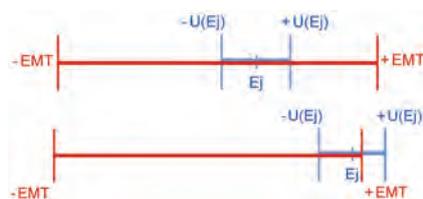
Pour vérifier une limite

Le dernier usage de l'incertitude est la confrontation du résultat de mesure à une limite, une norme. Le cas le plus connu en métrologie est celui de la vérification.

La vérification métrologique consiste à confronter le résultat d'un étalonnage à une erreur maximale tolérée (EMT).

Le résultat de l'étalonnage est une erreur de justesse associée à une incertitude. Pour être conforme, ce couple de valeurs doit être inclus à l'EMT.

À partir du moment où la zone « Erreur de justesse (Ej) ± incertitude sur l'erreur de justesse U(Ej) » dépassera la limite EMT, un risque de non-conformité sera présent. Ce cas se nomme du risque client (c'est le client qui prend le risque d'accepter un instrument de mesure comme



Les deux schémas ci-dessus représentent la vérification traditionnelle en métrologie. Le premier cas est considéré conforme, le deuxième est soit déclaré non conforme ou conforme avec risque client.

conforme alors qu'il ne l'est peut-être pas). Plus le débordement est important et le risque de non-conformité est fort.

Note : Cette vision traditionnelle est remise en cause par la nouvelle norme NF ISO/CEI Guide 98-4. De nombreux articles ont déjà été écrits sur l'approche proposée par cette norme. Il est probable que cette norme fera évoluer rapidement les pratiques qui restent souvent, à ce jour, telles qu'expliquées ci-dessous.

Dans les entreprises, plusieurs procédures sont observées :

1. Méconnaissance ou déni de l'incertitude

C'est un cas qui a tendance à diminuer depuis quelques années, mais qui se rencontre encore trop régulièrement. Dans cette approche, le métrologue oublie ou néglige l'incertitude. Il confronte l'erreur de justesse seule à l'EMT. Cette méthode est simple et ne perturbe pas l'utilisateur qui n'a pas à jongler avec le couple « erreur + incertitude ». Néanmoins cette méthode est erronée et peut apporter jusqu'à 50 % de risque client.



Avec cette méthode, l'opérateur fait l'hypothèse que l'erreur observée avec ses yeux est vraie... Si c'était le cas, cela signifierait qu'il utilise l'étalon parfait, les conditions opératoires parfaites... Séduisant, mais faux.

Note : Ce cas restera parfois légitime, notamment lorsque les incertitudes de mesure sont incontestablement négligeables devant la tolérance.

2. Utilisation d'une incertitude suffisamment petite

Ce cas est une version améliorée du précédent. Le métrologue est conscient que son étalon, sa méthode, son environnement ne sont pas parfaits. Il impose alors à cette incertitude d'être suffisamment petite pour être négligée. Il évalue cette dernière et surveille ce que l'on nomme la capacité d'étalonnage notée C. C'est le rapport entre l'EMT à vérifier et l'incertitude d'étalonnage U(étalonnage).

$$C = \frac{EMT}{U(\text{étalonnage})}$$

Si C est supérieure à une valeur définie en interne, le métrologue réalisera la vérification sans se soucier de l'incertitude considérée comme négligeable. Hormis en métrologie légale où cette pratique est utilisée (C ≥ 3 dans de nombreux cas en métrologie légale), il n'existe plus de norme d'organisation de fonction métrologie industrielle qui impose une telle procédure.

Cette méthode, imparfaite, est tout de même le début d'une prise de conscience de la présence de l'incertitude de mesure.

3. Soustraction de l'incertitude d'étalonnage à la valeur de l'EMT

Cette méthode, proposée par la norme NF EN ISO 14253-1⁽⁷⁾, réduit les EMT de la valeur de l'incertitude d'étalonnage. Elle regroupe l'avantage de la méthode 1 sans son inconvénient. Cette méthode est séduisante, mais elle ne fonctionne que si les EMT sont définies correctement, c'est-à-dire calculées en accord avec le besoin réel du produit et non pas des tolérances définies historiquement sans

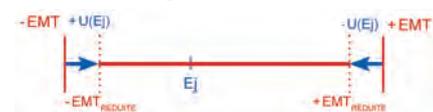
(7) NF EN ISO 14253-1 : Vérification par la mesure des pièces et des équipements de mesure – Partie 1 : Règles de décision pour prouver la conformité ou la non-conformité à la spécification.

« L'incertitude vient réveiller chez l'homme de nombreuses peurs, notamment celles de ne pas maîtriser, de ne pas tout contrôler. »

Composante	Symbole	Limite de variation [% volumique]	Loi suivie	Incertitude type [% volumique]	Contribution
Influence du système numérique de conduite centralisé	U_{SNCC}	$0,03\% \times 20$	Rectangle	$\frac{0,03\% \times 20}{\sqrt{3}} = 0.0034$	0,2 %
Influence de la répétabilité (issue de la documentation constructeur)	$U_{répét}$	$0,5\% \times 20$	Rectangle	$\frac{0,05\% \times 20}{\sqrt{3}} = 0.0577$	70,4 %
Influence du gaz étalon	$U_{Gazétalon}$	0,036	Normale 2σ	$\frac{0.036}{2} = 0.018$	6,8 %
Influence de la fluctuation du signal de sortie	U_{signal}	$0,2\% \times 20$	Rectangle	$\frac{0,2\% \times 20}{\sqrt{3}} = 0.0231$	11,3 %
Influence de la fluctuation de la tension électrique	$U_{Tension}$	$0,2\% \times 20$	Rectangle	$\frac{0,2\% \times 20}{\sqrt{3}} = 0.0231$	11,3 %

Extrait d'un calcul d'incertitude sur un analyseur de gaz, le budget d'incertitude permet du premier coup d'œil d'identifier les grandeurs majeures sur lesquels il faut porter son attention. Par exemple, il ne sert à rien dans cet exemple d'investir sur une bouteille de gaz étalon de meilleure qualité, ce n'est pas elle qui plombe le budget.

analyse de risque préalable. Par ailleurs, la production doit également être plutôt centrée que proche des limites pour réduire les risques.



Astucieuse méthode qui a comme avantage de ne pas se soucier de l'incertitude pour déclarer la conformité à condition que l'EMT réduite soit bien déterminée et stable dans le temps.

Pour améliorer son processus de mesure

Le dernier usage de l'incertitude réside dans la connaissance de son processus de mesure. En effet, évaluer une incertitude revient à décomposer et à chiffrer le poids des différentes grandeurs d'influence.

À l'image du budget de la maison, il est alors aisé d'identifier les composantes majoritaires. C'est sur ces dernières que

le métrologue travaillera pour les maîtriser ou pour les réduire si la valeur de l'incertitude est trop importante. L'évaluation des incertitudes de mesure est donc un outil puissant de l'amélioration continue.

Dans le prochain article, nous examinerons la première étape du calcul d'incertitude « l'identification des grandeurs d'influences ». Étape capitale de l'évaluation, mais aussi du dossier technique d'incertitude à constituer ●

« Il y a de l'incertitude sur l'incertitude. »

La question des incertitudes de mesure dans notre civilisation est une question quasi paradoxale. À la veille de la Révolution française, toute la population était confrontée, chaque jour, à ce qui était alors un problème. Pour preuve, les Français demandaient alors « Un Roi, une loi, un poids et une mesure ». L'État a, à l'époque, réglé cette « souffrance » en créant le Service des poids et mesures dont la mission était, et est encore, de garantir la loyauté des échanges commerciaux. En réussissant cette mission (qui doute des mesures de son boucher aujourd'hui ?), l'État a parfaitement réussi son challenge, peut-être même trop... Nous sommes tous nés dans ce monde où l'État agit efficacement pour

nous faire oublier ce doute inhérent à chaque mesure, à tel point que nous avons acquis la conviction inconsciente qu'il n'existait pas. La métrologie légale nous fait vivre dans un monde idéal de mesures justes... Fred nous a expliqué que la réalité était très différente de cette croyance. Les mesures ne sont pas, et ne peuvent pas être justes !

Comprendre les incertitudes de mesure pour trouver un réel intérêt à les estimer, c'est aussi comprendre le monde probabiliste. Là encore, notre éducation ne nous aide pas ... Depuis tout petit, nous faisons tous un peu de statistique et ce peu-là ne nous effraie pas. Qui, de nos jours, se sent mal à l'aise face à une moyenne ?

On a pris l'habitude, là encore depuis toujours, de calculer des moyennes. Or, ces dernières sont des « outils statistiques » qui n'ont pas dit leur nom, pour ne pas effrayer. En revanche, l'accès à toutes les notes d'une classe nous a conduits sur un mauvais chemin duquel l'évaluation des incertitudes de mesure nous impose de sortir. En effet, annoncer la note maximale et la note minimale de la classe, comme tous les parents les voient chaque trimestre sur les bulletins de notes suppose de connaître toutes les notes. Cette possibilité, offerte par un contexte particulier (les notes d'une classe), n'est pas toujours accessible dans les situations auxquelles les industriels sont confrontés. Est-il possible, par exemple, de

mesurer chaque pièce produite dans un process de décolletage, sachant qu'il s'agit de plusieurs milliers de pièces par jour ? Évidemment non, mais le souvenir de nos jeunes années nous a conduit, et là encore sans nous avertir, dans un mode de réflexion "déterministe". Nous croyons ce que nous voyons (le min et le max), parfois sans nous interroger quant à la réalité physique : *quid* du « min » et du « max » vrais dans un ensemble de plusieurs milliers de pièces qui n'ont pas toutes été mesurées ?

Les mathématiques simples ne permettent pas de prendre en compte toute la réalité de ce qui se passe lorsqu'on fait une mesure. Il est aisé de comprendre que tous les facteurs que Fred a listés et qui composent les bilans des causes d'incertitude ont peu de chances de tous s'exprimer au même moment, dans le même sens. Il y a quelques dizaines d'années encore, l'incertitude se calculait comme la somme de toutes ces erreurs. C'était simple, mais faux ! Cette somme algébrique, qui ne fait peur à personne, ne reflète malheureusement pas la réalité. Les erreurs qui s'expriment lors d'une mesure ont un caractère aléatoire. Lorsque Fred évoque « la fluctuation de la tension électrique », le mot « fluctuation » lui-même évoque ledit caractère aléatoire... Ainsi, l'incertitude de mesure naît de « la réalisation »⁽⁸⁾ de phénomènes aléatoires, c'est-à-dire de valeurs que prennent, au moment même d'une mesure, les facteurs qui contribuent au résultat : tension électrique donnée, signal de sortie donné, réalité du gaz étalon... Comme ces valeurs « données » ne sont pas systématiquement à la valeur maximale qu'elles peuvent prendre (ce ne serait vraiment pas de chance !), ce n'est pas la somme algébrique desdites



Annoncer la note maximale et la note minimale de la classe, comme tous les parents les voient chaque trimestre sur les bulletins de notes suppose de connaître toutes les notes. Cette possibilité, offerte par un contexte particulier (les notes d'une classe), n'est pas toujours accessible dans les situations auxquelles les industriels sont confrontés

valeurs maximales qu'il faut considérer, car cette somme est très très peu probable !

Les statisticiens ont étudié le comportement de ces mélanges de phénomènes aléatoires. Évidemment, les choses sont un peu plus compliquées que de simples additions, mais finalement pas tant que ça. Quand, dans le monde déterministe décrit plus haut, il suffit de faire des additions d'erreurs maximales, il suffira de la même façon, dans le monde probabiliste, de faire aussi des sommes linéaires. La seule véritable différence tient dans le fait que « l'objet mathématique » qui est manipulé n'est pas une erreur maximale (qu'on ne peut pas

connaître en réalité), mais une variance. La moyenne est connue de nous tous depuis toujours, on nous a habitués à l'école. La variance, qui caractérise la dispersion des valeurs, est un « outil » qui apparaît nouveau⁽⁹⁾ et qui fait souvent peur du simple fait qu'il semble nouveau ! La maîtresse n'en avait pas besoin, car elle connaissait le min et le max de la population totale que représente l'ensemble des notes de la classe. Dans la vraie vie, et lorsque la réalité n'est accessible que de façon parcellaire, c'est à dire au travers de quelques échantillons, il faut aller un peu plus loin que le min et le max apparents pour envisager tout ce qu'on n'a pas vu (et qui existe), car on ne peut pas tout voir !

Nous n'allons pas nous livrer ici à de grandes démonstrations statistiques. Une toute petite expérience va nous permettre de comprendre l'impérieuse nécessité de sortir de notre modèle déterministe pour entrer dans le monde probabiliste. Une fois convaincus de cette nécessité, les métrologues (et plus généralement les industriels) pourront trouver des outils qui leur permettront de répondre à l'ensemble de leurs questions quotidiennes : incertitude, conformité, périodicité, surveillance... Je l'ai souvent écrit dans ces pages, cet effort de compréhension ne peut être que récompensé, le seul risque est donc de ne pas le faire !

L'expérience consiste à lancer 5 dés⁽¹⁰⁾ et à faire la somme des valeurs obtenues sur chacun des 5 dés. On réalise dix observations et on retient le min et le max de chacun de ces échantillons de 10 valeurs. On réalise l'expérience 10 fois. Notons

(8) On parle de réalisation d'une variable aléatoire pour évoquer la valeur qu'elle prend en un temps donné. Le dé est une valeur aléatoire, puisqu'il peut produire des 1, 2, 3, 4, 5 ou 6. Quand on le lance, on « réalise » une valeur possible du dé.

(9) Les sciences statistiques datent de plusieurs dizaines d'années.

(10) Cette expérience est d'une simplicité enfantine. Vous pouvez la reproduire aisément chez vous, « à la main ».

« L'État agit efficacement pour nous faire oublier ce doute inhérent à chaque mesure, à tel point que nous avons acquis la conviction inconsciente qu'il n'existait pas. »

	Tirage N° 1	Tirage N° 2	Tirage N° 3	Tirage N° 4	Tirage N° 5	Tirage N° 6	Tirage N° 7	Tirage N° 8	Tirage N° 9	Tirage N° 10
Valeur N° 1	16	19	19	14	16	17	17	21	12	22
Valeur N° 2	22	25	20	12	13	20	16	14	15	12
Valeur N° 3	19	17	12	15	19	21	23	15	17	21
Valeur N° 4	16	10	15	17	22	16	8	11	19	23
Valeur N° 5	15	20	21	12	21	14	17	23	18	16
Valeur N° 10	20	1	21	18	23	16	18	22	14	18
Minimum observé	15,0	10,0	11,0	12,0	13,0	12,0	8,0	11,0	12,0	12,0
Maximum observé	22,0	25,0	21,0	27,0	23,0	21,0	23,0	23,0	22,0	23,0

Tableau 1.

	Tirage N° 1	Tirage N° 2	Tirage N° 3	Tirage N° 4	Tirage N° 5	Tirage N° 6	Tirage N° 7	Tirage N° 8	Tirage N° 9	Tirage N° 10
Valeur N° 1	16	19	19	14	16	17	17	21	12	22
Valeur N° 2	22	25	20	12	13	20	16	14	15	12
Valeur N° 3	19	17	12	15	19	21	23	15	17	21
Valeur N° 4	16	10	15	17	22	16	8	11	19	23
Valeur N° 5	15	20	21	12	21	14	17	23	18	16
Valeur N° 10	20	1	21	18	23	16	18	22	14	18
Minimum statistique	9,6	2,1	6,1	2,2	8,0	8,2	3,8	4,5	7,6	6,5
Maximum statistique	26,5	33,5	28,5	30,4	28,8	25,8	28,2	29,1	26,8	29,7

Tableau 2.

que nous connaissons le min et le max qu'il est possible d'obtenir en lançant cinq dés : 5 et 30. Qu'en est-il dans les échantillons ? (tableau 1).

On voit ici qu'aucune des dix expériences n'a révélé la réalité. On n'a pas vu, ni 5, ni 30 ! L'échantillon n'est donc pas la réalité ! On peut même dire qu'en moyenne sur les 10 expériences, le min observé vaut 11,6 et le max 23. L'erreur que nous faisons en croyant qu'il s'agit des réels extremum est donc égale à $(1 - (23-11,6)/(30-5)) = 54\%$, une bagatelle ! Combien faudrait-il d'observations dans chaque expérience pour avoir une chance de voir la réalité ? Sans entrer dans les détails des calculs, on peut dire qu'il en faudrait plusieurs centaines de millions ! Trop cher !

En utilisant les propriétés qui ont été démontrées par les statisticiens⁽¹¹⁾, les résultats de la même expérience sont très différents (tableau 2).

Dans ce cas, et avec les mêmes valeurs dans chaque échantillon, l'erreur n'est

« Une toute petite expérience va nous permettre de comprendre l'impérieuse nécessité de sortir de notre modèle déterministe pour entrer dans le monde probabiliste. »

plus que de $(1 - (28,7-5,9)/(30-5)) = 10\%$ (pour le même "prix" que plus haut) !

À l'époque des tableurs, la question n'est plus dans les formules. Il nous faut comprendre les propriétés des phénomènes aléatoires et sortir du monde déterministe des croyances faciles, mais tellement éloignées de la réalité.

L'objectif de ces quelques lignes est de convaincre le lecteur de l'intérêt de cette approche, de façon à l'aider à dépasser l'effort apparent qu'il convient de faire. Il ne faut pas se laisser rebuter par l'approche calculatoire qui est souvent présentée comme au cœur de l'estima-

tion des incertitudes de mesure. En fait, ce n'est pas vraiment la question. La vraie difficulté tient en l'acceptation du monde probabiliste, et dans ce monde, nous ne ferons finalement que des additions. Rendez-vous au prochain numéro ! ●

(11) Dans le cas d'un tel phénomène, la distribution des valeurs possibles suit pratiquement une loi de probabilité dite « normale ». Les minimum et maximum statistiques donnés dans le tableau sont calculés comme étant la moyenne -3 écarts-types pour le minimum, la moyenne +3 écarts-types pour le maximum (c'est à dire pour couvrir 99,73 % des valeurs).