

SUR L'ENVIRONNEMENT, LES TRANSPORTS ET LES « LOIS D'IMPACT »

MICHEL MAURIN
LTE
INRETS¹

1. INTRODUCTION

La notion de « loi d'impact » se rencontre couramment dans les études sur l'impact des pollutions et des nuisances en Environnement, et naturellement l'examen des conséquences des Transports sur l'Environnement n'a pas échappé à cette nouvelle préoccupation. Avec le terme « loi d'impact », on désigne communément une relation entre la présence objective d'une pollution dans l'environnement et sa conséquence en termes « d'impact » en général, que l'on peut également appeler effet, conséquence ou réponse (sous-entendu de la part du milieu qui pâtit de la pollution). On peut aussi appeler cette relation « loi de réponse », et elle figure encore sous divers autres termes tels que courbes dose-réponse, gêne-bruit, stimulus-réponse, *exposure-response* en acoustique environnementale (MIEDEMA, VOS, 1998). Depuis l'émergence du contexte environnemental, ces lois sont devenues l'objet d'une attente certaine aussi bien dans le cas général (LEROND et alii, 2003), que dans le cas particulier des nuisances acoustiques où il faut

¹ Affiliation de l'auteur lors de la rédaction initiale de l'article (2010).

développer « *a major effort [...] directed toward finding a relationship between noise exposure metrics and a measure of activity interference [...] or annoyance [...]* » (FICON, 1992), ou celui de la pollution de l'air avec le souci « *d'identifier et de quantifier la relation existant entre la pollution et la mortalité ou la morbidité* » (MEDINA et alii, 1994) puisque l'on y constate de « *nombreuses lacunes dans les relations dose-réponse* » (MOMAS et alii, 2004). Les principales pollutions se rejoignent ainsi dans cette attente, et la disposition d'une bonne « *relationship with effects* » comme critère (VAN DEN BERG, 1999) est une autre manière de souligner cet intérêt grandissant.

Plusieurs de ces lois sont déjà en usage mais les rappels ci-dessus sont le signe qu'elles ne donnent pas toute la satisfaction que l'on attend d'elles. Les partenaires de l'Environnement en effet sont nombreux et différents, et l'on peut craindre à cause de cela que des raccourcis ou des confusions ne se glissent dans l'édifice des concepts et des outils qui sont mis en œuvre. Il en résulte, de notre point de vue, qu'il est nécessaire d'introduire un certain outillage mathématique dans les composantes de ces lois pour aider à la clarté des échanges. Ainsi, en premier lieu, cet article positionne ces lois dans une structure générale d'analyse, et met l'accent sur des aspects formels et syntaxiques qui paraissent indispensables pour clarifier la problématique de l'environnement. L'article présente ensuite quelques méthodes ou techniques appropriées mais peut-être également méconnues ou perdues de vue.

2. LA STRUCTURE ET LES NOTIONS QUI SONT EN JEU

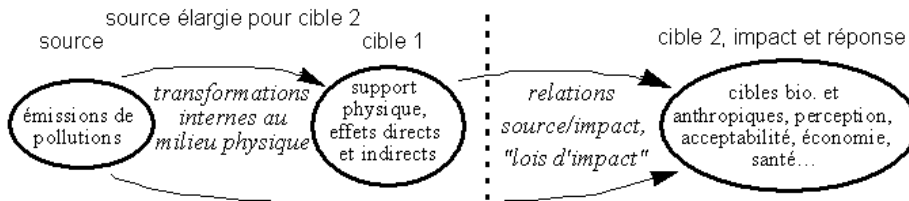
Le rôle des lois d'impact apparaît clairement quand on explicite les notions qui les accompagnent et la structure dans laquelle elles se doivent d'être insérées. Cela résulte évidemment du mécanisme des pollutions ; pour l'essentiel il s'agit d'un ensemble de phénomènes physiques ou chimiques très variés mais possédant dans le même temps suffisamment d'aspects communs pour qu'on puisse les décliner autour d'un schéma général, de l'émission à l'impact produit.

2.1. SCHÉMA COMMUN ET INDICATEURS

L'émission a lieu dans un milieu physique, lequel est également le support de transformations physico-chimiques nombreuses, directes et indirectes au sein d'une grande « *chimie de l'atmosphère* » (GOGER, 2006), ainsi que la première cible touchée par le phénomène comme l'est par exemple le réchauffement de l'atmosphère dû à l'émission de gaz à effet de serre (Figure 1). Cela constitue de la sorte une source élargie uniquement physico-chimique située à l'amont immédiat de la seconde cible que constitue le milieu vivant ou « *cible bio* ». Cela rejoint la distinction entre « *les modalités de contamination de l'environnement* » d'une part et « *leurs mécanismes d'action et de leurs effets sur l'ensemble des êtres vivants* » de l'autre (RAMADE,

1977). Dans la suite nous limitons le terme d'impact à la réponse de la cible bio, et la notion de loi d'impact ou de réponse à la relation entre les pollutions de la source élargie et la réponse de la cible bio (MAURIN, 2006a).

Figure 1 : Un cadre commun pour le cheminement des nuisances et pollutions



Dans ce contexte on rencontre des indicateurs environnementaux. Ce ne sont bien entendu que des outils destinés à circonscrire l'information, et ils doivent *a minima* présenter une valeur ajoutée par rapport aux variables de source. Pour cela ils doivent également procéder de constructions structurées moyennant par exemple l'introduction de grandeurs ou variables à différents niveaux, ainsi que d'étapes de transformations et de passages des unes aux autres.

2.2. ÉTAPES ET GRANDEURS

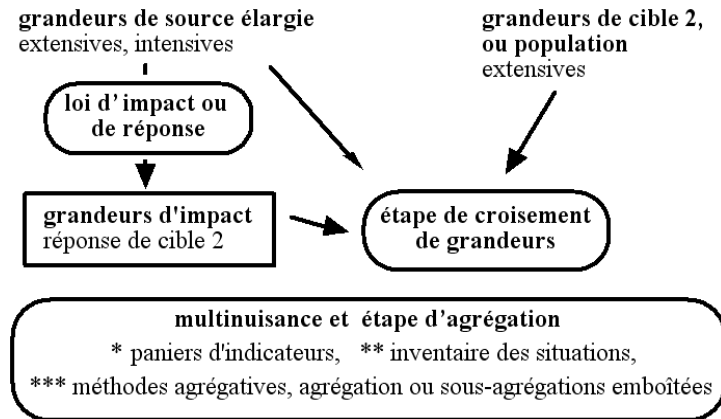
Parmi les grandeurs, nous posons les grandeurs de source qui caractérisent l'état physique et objectif de la source élargie, les grandeurs d'impact qui caractérisent la réponse de la cible bio, ainsi que des grandeurs de cible ou de population, car on est souvent amené à évaluer les parts de cibles ou de sous-cibles du vivant qui sont exposées à une pollution (Figure 2).

La loi d'impact ou de réponse entre la source et l'impact fait partie des étapes de construction. On y rencontre souvent également le croisement entre ces deux familles de grandeur d'une part et les grandeurs de population de l'autre, afin de quantifier l'importance de l'exposition de la cible bio aux nuisances ou à leurs effets.

Cette analyse formelle des indicateurs se poursuit avec la distinction entre les grandeurs extensives et intensives par exemple. Les extensives sont des grandeurs de sous-ensembles comme les émissions dans un quartier, une ville, une région... et elles sont additives pour deux ensembles disjoints (émissions des villes A et B par exemple) ; les grandeurs de population sont aussi extensives (et additives). Au contraire les grandeurs intensives sont définies en chaque point comme une teneur en gaz ou un niveau de bruit et elles caractérisent l'exposition proprement dite. On retrouve ici la dualité classique entre la pression p intensive et le volume V extensif des gaz, ou le prix unitaire p intensif et la quantité Q extensive pour une production. Le croisement se fait entre une grandeur intensive et une grandeur extensive,

comme p-V ou p-Q dans les exemples ci-dessus. Pour sa part le passage des émissions extensives aux teneurs ou concentrations intensives résulte des nombreuses transformations, propagation, diffusion qui ont lieu au sein de la source physique élargie.

Figure 2 : La morphologie des indicateurs, les grandeurs et les étapes



On retrouve une distinction plus ou moins comparable avec le temps, les émissions sont extensives sur des durées temporelles, c'est-à-dire additives sur deux périodes disjointes tandis que les grandeurs de source intensives suivent une évolution temporelle. De leur côté les grandeurs de population extensives suivent également une évolution temporelle (et non additive entre périodes temporelles), de sorte que les grandeurs qui interviennent conjointement dans un croisement possèdent le même statut évolutif.

L'étape suivante est celle de l'agrégation de plusieurs impacts. Jusqu'ici on n'a évoqué que des grandeurs liées à une seule source bien caractérisée, mais l'observation montre que l'on est le plus souvent en présence de plusieurs pollutions ou nuisances (MAURIN, 2006a ; ROUSVAL, MAURIN, 2008). C'est ce qui est notamment abordé par de grands systèmes d'indicateurs PER, DPSIR et DPSEAA, et il s'avère que leur progression trouve un aboutissement au moyen de la structure ci-dessus (MAURIN, 2006b ; MAURIN, 2006c). En dernier lieu, l'accent mis sur le mode de construction des indicateurs environnementaux permet de mieux situer le « marché des indicateurs » à l'interface des attentes des partenaires de l'environnement et d'une offre structurée du milieu scientifique.

2.3. UNE QUESTION ASSOCIÉE DE VOCABULAIRE

Il vient aussi se greffer en parallèle une question de vocabulaire ; en effet le schéma de la Figure 1 est assez répandu, mais comme il s'applique à chaque nuisance souvent repliée sur sa thématique en propre, les mêmes notions générales se retrouvent sous des noms différents et cela peut entraîner des

difficultés de communication entre les différents métiers concernés. Une autre suite à l'analyse ci-dessus est ainsi une réflexion sémantique afin de disposer d'un vocabulaire partagé par chaque thématique/pollution sans qu'il soit pour autant la copie de l'un d'entre eux, « *ni tout à fait le même ni tout à fait un autre* » à la manière de VERLAINE, et avec des mots comme « *bêtes de l'Idée* » à la manière de HUGO, pour bien rendre compte des notions et des concepts qui sont mis en jeu à l'occasion de la problématique de l'environnement.

3. GRANDEURS DE SORTIE ET LOI D'IMPACT

Le schéma de la Figure 1 se conclut avec une relation entre les grandeurs de source élargie et les grandeurs d'impact, laquelle est chargée de traduire l'évolution de l'importance que prend l'impact en fonction de l'exposition. Cela comprend sur le plan technique les trois éléments classiques que sont la variable d'entrée, la variable de sortie et la correspondance entre les deux.

3.1. LES TROIS INGRÉDIENTS DE LA LOI D'IMPACT

a) Nous avons rappelé que la variable d'entrée est une grandeur intensive de la source élargie, à l'issue éventuellement des transformations au sein de cette dernière. C'est aussi, est-il besoin de le préciser, une variable objective que l'on peut mesurer ou encore simuler ou modéliser, mais qui dans tous les cas est exprimée dans des unités connues de physique et de chimie.

b) Le statut de la variable de sortie est plus vaste. En effet, une observation banale montre que la cible bio peut « répondre » de bien des manières différentes aux pollutions environnementales auxquelles elle est exposée, et chacune des grandeurs que l'on envisage pour traduire chacune de ces conséquences peut être considérée comme une grandeur d'impact. Bien entendu, une telle grandeur nécessite une définition précise, elle peut être objective, par exemple l'évolution d'une population en termes démographiques, mais également subjective lorsque cela concerne les opinions et les ressentis de la cible anthropique. C'est le cas par exemple de la gêne due au bruit : « *On one point there seemed to be agreement, [...] that people's subjective responses could be measured along a scale of annoyance [...], responses arrayed along a numerical annoyance scale having 4, 5, 6 or 7 (or more) steps* » (SCHULTZ, 1978).

En complément, il y a lieu de se soucier du statut formel de cette grandeur ; en effet à l'opposé des grandeurs physiques numériques auxquelles nous sommes habitués, ce sont ici le plus souvent des notions qualitatives comme les grandeurs aristotéliennes et scolastiques avec divers degrés (DUHEM, 1995 ; ROSS, 2006 ; TARANTOLA, MERCERAT, sd), les « *steps* » de SCHULTZ par exemple sur des échelles de catégories ordonnées. Et l'on assiste en corollaire à la question clé de la numérisation de ces données dès que le

besoin d'une expression numérique des résultats se fait sentir au niveau de la loi d'impact.

c) La loi d'impact est la relation qui se manifeste entre les deux, comme le sont les autres lois qui nous renseignent sur les « *rythme et structure invisibles des phénomènes* » (FEYNMAN, 1980), ou sur « *l'énoncé d'une relation constante entre deux ou plusieurs phénomènes qui dépendent les uns des autres* » (MEYNARD, 1958). Par conséquent l'expression de cette loi doit respecter une syntaxe rigoureuse, et l'on note qu'elle est notamment dépendante du statut de la grandeur d'impact. Les deux points b) et c) se révèlent *de facto* fortement liés entre eux, et la solution retenue pour l'expression d'une loi doit tenir compte de ce couple et des techniques mathématiques qu'il autorise.

3.2. QUELQUES PREMIERS COMMENTAIRES

- Pour une pollution donnée il peut naturellement y avoir plusieurs impacts associés ; si tel est le cas cela peut donner lieu à autant de grandeurs d'impacts et de lois que le nombre d'impacts que l'on retient. En réponse à la nouvelle donne des préoccupations environnementales, la définition des grandeurs d'impact et l'établissement des lois associées sont autant de challenges scientifiques à affronter, et même des challenges originaux et passionnants.

- On peut ajouter qu'il y a dans le sujet quelques chausse-trapes qu'il vaut mieux identifier d'emblée et tenter de corriger.

i) L'un provient de l'Acoustique environnementale. Cette discipline a posé par exemple une échelle catégorielle pour évaluer la gêne due au bruit (SCHULTZ, 1978), elle réclame à juste titre « *a major effort* » (FICON, 1992) en faveur des lois d'impact, et elle a aussi un penchant certain pour introduire un grand nombre d'indices acoustiques ou « *noise metrics* » (LIÉNARD, 1978 ; MAURIN, 2008 ; SMITH, 1990) afin de mesurer le bruit. Parmi ceux-ci cependant, on rencontre des indices qui sont fondés sur la réponse de l'homme comme les noys, le PNdB (P pour *perceived*), le PSIL (P pour *preferred*) ou encore des résultats basés sur le *noise rating* (LIÉNARD, 1978 ; MAURIN, 2005). C'est ainsi que l'on est amené à caractériser un phénomène objectif à l'origine d'une réponse par la réponse elle-même, ce qui revient à nier ou occulter le rôle de la transformation entre la cause de la réponse et la réponse. C'est ce qui se produirait si l'on se mettait à faire de la thermodynamique avec la notion récente de température ressentie au lieu de la température dite absolue en degrés Celsius ou en degrés Kelvin. Il faut donc se méfier des grandeurs d'impact qui par excès de zèle en viennent à occulter la notion de loi d'impact.

ii) Un risque moins grave mais comparable à certains égards vient de la pollution de l'air qui a souvent pris l'habitude (avec d'autres disciplines il est

vrai) de parler en terme générique de « facteur », des facteurs d'exposition et des facteurs d'effet (GÖGER, 2006), en utilisant l'expression de « facteur d'effet » pour désigner ce qui est à l'origine de l'effet (PERSONNE, BRODHAG, 1999). Dans le schéma d'une loi, cela revient à désigner la variable d'entrée par le nom de la variable de sortie. Cette manière de s'exprimer n'occulte pas *stricto sensu* la relation proprement dite mais il serait cependant préférable de ne pas l'encourager, car cela revient à mettre la relation au second plan et à masquer en partie son rôle et son importance.

iii) Un autre risque encore pourrait provenir de l'expression « "Perception-Exposition" à propos d'une interrogation sociétale [...] » (ROUSSEL et alii, 2010). En l'occurrence l'ordre inverse eût sans doute été plus judicieux, et eût pu mieux signaler l'ordre des phénomènes considérés.

De tels modes d'expression avec leurs travers potentiels risquent d'affaiblir la distinction nécessaire entre les variables d'entrée et de sortie, ici du domaine physico-chimique objectif d'une part et du ressort de la réponse d'un milieu exposé de l'autre. L'effort fait pour introduire une variable d'impact en sortie pourrait mériter davantage d'attention.

4. QUELQUES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION

Il s'agit ensuite de construire ces lois, c'est-à-dire de préciser leur expression analytique à l'aide des outils syntaxiques des mathématiques, tout en sachant que d'une manière générale l'attente est implicitement le plus souvent celle d'une relation fonctionnelle numérique (LEROND et alii, 2003). On peut rappeler également qu'une forte impulsion pour de telles lois a été donnée par la psychophysique initiée par FECHNER en 1860 (un joli nom qui ne peut masquer ses motivations) avec des relations fonctionnelles explicites entre les grandeurs d'excitation des sujets et leur sensation en réponse. Plusieurs solutions ont été apportées à cette question, elles dépendent en grande partie du statut de la grandeur de sortie, et cela montre s'il en est besoin le fort couplage entre la grandeur d'impact et la loi d'impact associée.

4.1. LES LOIS DE STEVENS ET AUTRES LOIS PSYCHOPHYSIQUES

Un exemple phare est celui des lois de STEVENS, lequel désigne explicitement sa démarche « *nomothetic* » en réhabilitant le *nomos* grec à fort bon escient (STEVENS, 1971). En fait, il s'appuie essentiellement sur une production de la grandeur d'impact considérée d'emblée comme numérique moyennant son procédé de l'estimation de la grandeur (*magnitude estimation*). Selon ce procédé, la valeur numérique de la sensation éprouvée est évaluée en proportion de la sensation qui est due à une stimulation de référence.

La construction de ces lois résulte *in fine* d'une observation empirique, pour les stimulations dites prothétiques. En effet, la croissance de la sensation

ainsi numérisée s'ajuste raisonnablement bien sur une application puissance x^α , avec un exposant α propre à chaque stimulation.

Les grandeurs d'impact en environnement procèdent cependant assez peu de la *magnitude estimation*, de la même façon qu'elles n'utilisent guère le formalisme de la loi de FECHNER, « *widely defended but not widely applied since his day* » (LUCE, EDWARDS, 1958). En revanche les grandeurs d'impact qui sont introduites dans différents domaines de l'environnement font souvent appel aux degrés de grandeurs qualitatives aristotéliennes et donc à des items discrets, des steps ou des catégories C_j , $j = 1 \dots J$, un mode de recueil bien utilisé en psychophysique s'il en est. Nous nous intéressons ci-après à ce type de loi en même temps qu'à divers procédés de numérisation des catégories.

4.2. UNE NUMÉRISATION PAR DÉFAUT, LE POURCENTAGE D'UN ITEM QUALITATIF

Un premier mode de numérisation, opportuniste mais bien utilisé malgré tout, est celui de la proportion d'un item sur l'ensemble des réponses possibles. Une proportion est comprise entre 0 et 1, ou 0 et 100 avec des pourcentages, et cela a pour effet d'introduire un nombre %cat dans la grandeur d'impact. La loi consiste alors à exprimer l'évolution de ce %cat en fonction de la grandeur de source x à l'origine de l'impact, et l'on recherche une expression analytique pour l'application %cat(x). Par exemple SCHULTZ a rassemblé les degrés ou steps les plus élevés dans les échelles qu'il propose (à partir de ses 4 ... 7 or more) pour poser une nouvelle catégorie de réponse HA (*Highly Annoyed*).

On rencontre à nouveau une certaine variété d'options techniques pour l'acquisition d'une expression fonctionnelle pour %HA(x), avec le niveau de bruit noté x .

i) La première est pré-analytique et consiste simplement à rapporter les valeurs recueillies pour les x_i . Il est aussi possible de faire figurer plusieurs de ces lois en parallèle en retenant plusieurs catégories de réponses ou regroupements de catégories (OLIVA, 1993), par exemple les % $C_4(x)$, % $C_3(x)$ + % $C_4(x)$ = % { $C_3 \cup C_4$ }(x), etc., avec une échelle d'impact-gêne à 4 catégories (Figure 3).

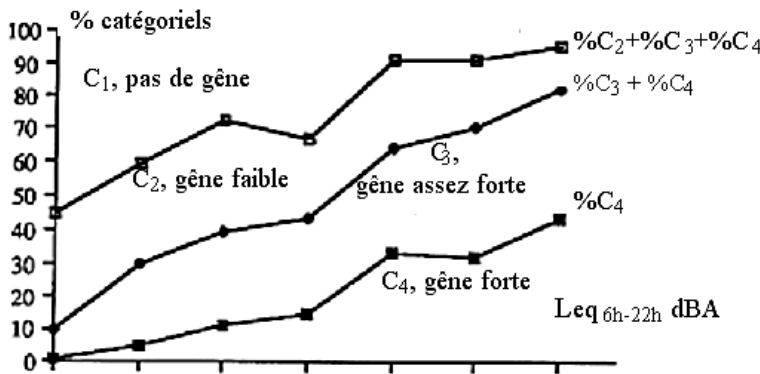
ii) La suivante propose un ajustement analytique à partir des x_i ; par exemple SCHULTZ (1978) a retenu l'ajustement polynomial

$$\%HA(x) = 0,8553 x - 0,0401 x^2 + 0,00047 x^3$$
 pour $x > 50$ environ.

iii) Cela a convenu jusqu'à ce que l'on s'aperçoive que pour des valeurs élevées un polynôme croît (évidemment) au-dessus de 100. Pour y remédier, on a introduit un modèle probabiliste avec des probabilités qui modélisent les fréquences observées. Le plus courant est le modèle linéaire généralisé (GLM, *generalised linear model*) en retenant comme fonction de lien (*link*

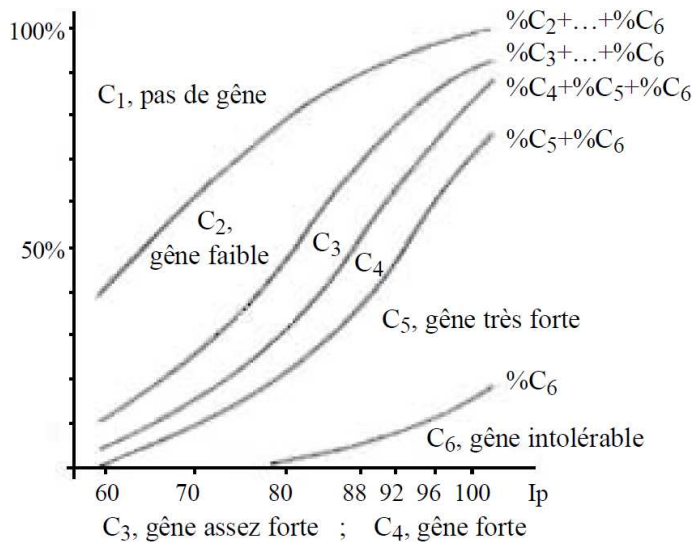
fonction) la réciproque F^{-1} de la fonction de répartition de la loi logistique (MC CULLAGH, NELDER, 1989), on parle aussi de régression logistique. La Figure 4 illustre ce modèle avec des données provenant d'une échelle à 6 catégories, elle montre la suite des ajustements $\%C_6(x)$, $\%\{C_5 \cup C_6\}(x)$, $\%\{C_4 \cup C_5 \cup C_6\}(x)$, etc., d'après CHARDEY (1988).

Figure 3 : Différents $\sum_k \%C_h(x)$ avec une échelle de gêne à 4 catégories



x, grandeur de source, est l'indice acoustique $L_{eq6h-22h}$, en dBA (d'après OLIVA, 1993)

Figure 4 : Différents $\sum_k \%C_h(x)$ ajustés avec la régression logistique sur une échelle de gêne à 6 catégories



La grandeur de source x est l'indice acoustique I_p (d'après CHARDEY, 1988)

On récupère ainsi une formulation fonctionnelle qui a l'allure d'une loi. Il faut cependant ne pas perdre de vue que ces lois résultent d'une procédure d'ajustement statistique sur des données et que toute expression que l'on en retire n'est que relative car elle dépend des données qui servent à l'ajustement.

iv) Il y a dans le cadre du GLM d'autres lois F que la loi logistique (loi normale, loi des extrêmes de FRÉCHET-FISHER-TIPPETT...) qui peuvent être utilisées, mais il y a également d'autres possibilités pour ajuster des évolutions de %cat que le seul GLM, d'autant plus que ce dernier présente un inconvénient majeur. En effet, pour la valeur nulle de la variable explicative x , le GLM donne très souvent une valeur modélisée $\text{Prob}(\text{cat}(0))$ de %cat(0) différente de zéro, en désaccord par conséquent avec la condition de bon sens selon laquelle « *it predicts no effect when no drug is present* » en matière de relation dose-effet (HOLFORD, SHEINER, 1981).

De nombreuses lois de probabilité connues sur \mathbb{R}^+ permettent d'éviter cette situation, les lois log-normale, gamma, de Halphen A, et la formulation la plus commode est celle des « lois de HILL ». HILL a reçu le prix Nobel de Médecine en 1923, il n'était nullement statisticien, mais il a écrit en 1910 un papier à la fois laborieux sur le plan mathématique et majeur à propos de la réponse à une injection en termes de pourcentage d'effet (HILL, 1910). Une grande partie de la pharmaco-dynamique et cinétique s'y réfère en effet pour des relations dose-effet (MAURIN et alii, 2000 ; GOUTELLE et alii, 2008), et HILL rejoint ainsi quelques auteurs comme CAUCHY, DIRICHLET, ou PARÉTO pour laisser son nom à une distribution sans avoir été probabiliste. L'intérêt de cette formulation, c'est qu'à la différence des lois qui interviennent avec leur densité f , les lois de HILL font intervenir la fonction de répartition F sur \mathbb{R}^+ , comme le font les familles de lois de BURR (BURR, 1968). Les lois de HILL sont de la forme $\% (x) = 100 \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + (x/c)^\alpha}\right)$ avec un paramètre de taille c et un paramètre de forme α , et elles souscrivent à « *no drug, no effect* » par construction. En outre ces lois présentent une allure sigmoïde bien appréciée (HOLFORD, SHEINER, 1981), avec une zone de forte croissance pour les faibles valeurs d'exposition, un point d'inflexion et une zone de ralentissement de croissance.

4.3. LA NUMÉRISATION DIRECTE DES CATÉGORIES

On peut aussi considérer que la catégorie donnée est la réponse d'impact, et par conséquent chercher à numériser les réponses catégorielles de l'échelle comme on le fait couramment en psychophysique depuis THURSTONE notamment (MARTIN, 1997 ; TORGERSON, 1958). Cette numérisation s'inscrit dans un vaste mouvement également initié avec la psychométrie de PEARSON (MARTIN, 1997), et cela s'inscrit dans la mouvance du « *quantitative imperative* » (MICHELL, 1990), de la quantophrénie de SOROKIN (PARAINVIAL, 1981) ou encore du « *number appeal* » et de son « *numerical relationship appeal* » associé (MAURIN, 2003).

i) On rencontre de même plusieurs options pour numériser les catégories. L'une d'entre elles consiste à accorder à la catégorie la valeur du rang dans

l'échelle, c'est une pratique forfaitaire et bien rustique, en effet « *to the theorist, however, the whole business is a bit hair-raising, [...], because there is nothing about the procedure to prevent one from labelling the categories by any other increasing sequence of numbers* » (LUCE, GALANTER, 1963) ; cela n'a cependant nullement empêché cette pratique d'avoir du succès et de donner lieu à de nombreux calculs arithmétiques ordinaires à partir des simples valeurs de rang (MIGNERON, 1980 ; VALLET, 1996).

i') Pour tenter d'être exhaustif, on peut rappeler aussi de nombreuses techniques de numérisation plus ou moins sophistiquées comme les pratiques de *scaling* ou de *scoring* (AGRESTI, 1990), ainsi que la possibilité de produire directement une valeur numérique avec la position de la réponse signalée par un curseur sur un segment donné. Après quoi, sur de telles données numériques ou numérisées, on a noté que « *the devil is in the average* » (BOTTELDOOREN, LERCHER, 2004).

ii) Cependant il vaut mieux s'efforcer d'assigner aux catégories des valeurs numériques qui rendent mieux compte de l'intensité de l'impact attaché aux réponses. Une telle numérisation des degrés d'une grandeur qualitative aristotélicienne a d'ailleurs été pressentie dès l'époque scolastique avec des Parisiens et des Oxfordiens (BURIDAN, ORESME, BRADWARDINE par exemple) qui ont fini par énoncer la « *Règle de MERTON : toute qualité mesurable peut être imaginée comme une quantité continue* » (ROSS, 2006).

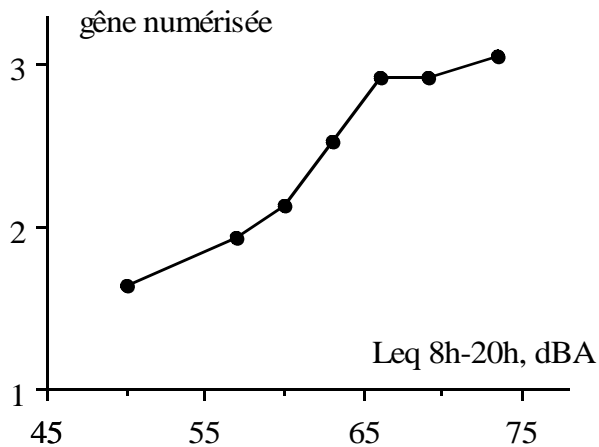
iii) Depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle, ce rôle incombe à la théorie du mesurage (*measurement theory*) de SUPPES et ZINNES (1963), une théorie qui aborde de front la numérisation de données qualitatives, ainsi que le statut technique des échelles numériques ainsi obtenues : nominale, ordinale, d'intervalle ou de rapport par exemple. La théorie se soucie également de la pertinence (*meaningfulness*) des énoncés numériques (*statements*) qui en résultent (ROBERTS, 1979 ; SUPPES, ZINNES, 1963). Pour ce faire, la démarche s'appuie sur les relations qualitatives ou ordinales qui sont constatées sur les observations, et elle développe des applications entre les données et des espaces mathématiques *ad hoc* (la droite R par exemple) qui respectent les relations en question. Cela donne lieu en premier à un « théorème de Représentation » à propos de l'existence de ces applications, puis d'un « théorème de Caractérisation » (*Uniqueness*) lorsque l'on est en présence de plusieurs solutions. En suivant ces précautions, le mesurage permet ainsi de « révéler » l'existence de cette représentation, puisque par construction elle respecte les conditions uniquement pré-numériques qui sont observées sur les données. C'est de la sorte un aboutissement théorique de la Règle de MERTON et du projet de FECHNER avec son souci d'établir des lois de réponse numériques.

Pour ces mêmes raisons également le mesurage s'oppose au *scaling* ou à tout autre procédé comme celui des valeurs de rang, puisque ceux-ci postulent

implicitement l'existence d'une numérisation et ne se soucient pas davantage de la qualité de la représentation obtenue.

iv) Le mesurage des intervalles successifs (ADAMS, MESSICK, 1958 ; SUPPES, ZINNES, 1963) est le volet qui s'applique aux échelles de catégories, et cela aussi bien en réponse à une exposition unique que multidimensionnelle (MAURIN, 2009). Les catégories sont représentées par des intervalles sur une échelle numérique d'intervalle et cela constitue une amélioration décisive de la loi des jugements catégoriels de THURSTONE (TORGERSON, 1958). On en déduit également les valeurs $\varphi(x_i)$ de l'impact correspondant à chaque exposition x_i , $i = 1 \dots I$, les $\varphi(x_i)$ étant bien entendu sur la même échelle de mesurage que les bornes des intervalles, avec φ l'application pertinente entre les expositions et les réponses. La Figure 5 est le graphe d'une telle relation avec la gêne recueillie sur une échelle à 4 catégories en fonction d'une exposition au bruit (MAURIN, 2003).

Figure 5 : Loi d'impact avec les intervalles successifs



v) La ressemblance visuelle avec les relations de la Figure 3 est trompeuse ; les $\varphi(x_i)$ sont ici des valeurs numériques pertinentes pour la grandeur de sortie, et les calculs que l'on fait avec elles ne sont pas « *a bit hair raising* » comme en i). En premier on peut observer l'allure de la loi, avec sur cet exemple une succession de zones à croissance faible et forte, la présence d'une inflexion puis une zone de ralentissement de croissance dont les rangs à eux seuls ne peuvent évidemment pas rendre compte. Plus généralement on note que cette méthode répond correctement au « *number appeal* » sans répondre au « *numerical relationship appeal* » comme le font le logarithme de FECHNER ou les puissances de STEVENS ; théoriquement et pratiquement cela répond à une question de fond et moins à une attente de forme.

4.4. AUTRES COMMENTAIRES

i) Ces exemples de lois numériques, certes, souscrivent au « *paradigme relationnel* » (LARGEAULT, 1993), mais cependant malgré le souci du nomos de STEVENS et le respect des données observées, elles ne procèdent pas de l'expression de Principes en amont (OMNÈS, 1994). Il en est pour elles comme pour « *les lois de la biologie [qui] ne sont pas tout à fait les mêmes que celles de la physique* » (FOX-KELLER, 2007).

ii) Le recueil de réponses catégorielles entraîne également *a minima* pour ces lois une autre particularité qui les distingue des lois physiques, indépendamment du fait que la variable de sortie est objective ou non. En effet, les variables physiques sont l'expression d'une correspondance univoque alors que, par essence même, quand on propose un éventail de catégories pour répondre, la grandeur de sortie n'est pas univoque. On a donc ici des lois multivoques comme on peut le noter quand on explicite des pourcentages catégoriels de plusieurs catégories (Figures 3 et 4 par ex.). C'est aussi le cas des évolutions de pourcentages pour les catégories HA, A (*annoyed*) et LA (*lowly annoyed*) (MIEDEMA, VOS, 1998), moyennant ici malencontreusement un retour aux polynômes comme au temps de SCHULTZ (MAURIN, 2005).

Pour autant, chaque solution confère à la loi et à son expression le rôle que l'on attend d'une telle relation.

5. EXEMPLES THÉMATIQUES ET AUTRES TECHNIQUES

Les exemples ci-après sont de portée générale ou spécifique, et ils n'ont nullement la prétention de couvrir tout le champ des lois d'impact que l'on peut être amené à envisager dans le champ des transports. Ils ont en commun d'être des illustrations de ce qui peut être fait en piochant dans le formalisme mathématique qui est à notre disposition et qui peut être rapproché de la thématique de chaque exemple. Ce qui importe, c'est que l'on puisse exploiter des opportunités pour établir des correspondances entre variables d'entrée et de sortie, à charge des variables de sortie d'être des grandeurs d'impact bien introduites.

5.1. LES LOIS EN ACOUSTIQUE

Elles ont servi d'illustration dans le paragraphe précédent, on rappelle qu'elles font appel aux rangs des catégories, à la théorie du mesurage des intervalles successifs et à divers modèles probabilistes pour des évolutions de pourcentages %cat(x).

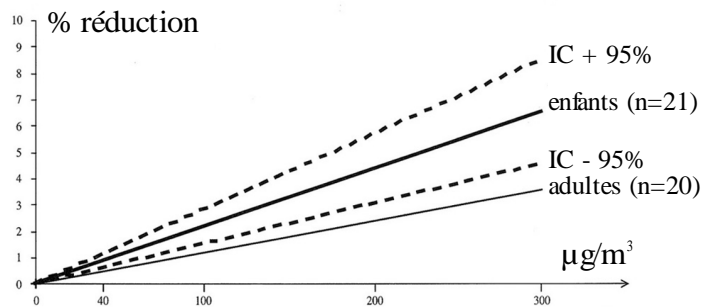
5.2. LES LOIS EN POLLUTION DE L'AIR

Dans ses généralités la pollution de l'air envisage plusieurs sortes d'impacts en distinguant la « réponse » et « l'effet » (FROMENT, 1987), à l'instar de la

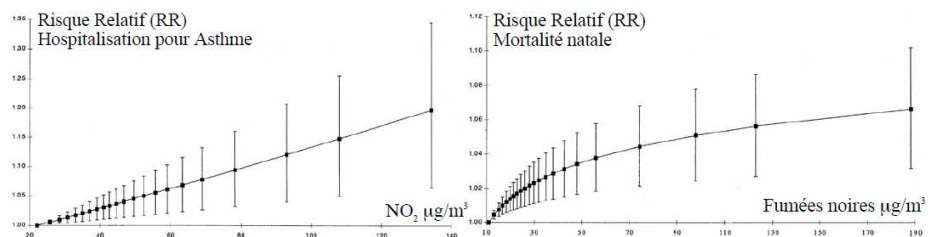
présentation du 3.1.b. La « réponse » dans des courbes dose-réponse concerne la fréquence de réponse relative à une catégorie particulière, et « l'effet » dans des courbes dose-effet s'applique à une grandeur particulière retenue pour caractériser l'effet en question. Les fréquences d'une catégorie semblent malgré tout les plus nombreuses, notamment avec un choix catégoriel binaire du type {C, non C}, par exemple les modalités {malade, non malade} pour la morbidité à un polluant ou {décédé, non décédé} pour la mortalité. Comme précédemment en acoustique on est donc intéressé par l'évolution, la formulation et/ou la modélisation de la fréquence %C(x) à l'aide d'un modèle probabiliste, et la restriction à une situation uniquement dichotomique renforce les aspects fonctionnel et univoque de ces lois d'impact.

La modélisation des %C en pollution de l'air peut être simple (Figure 6, d'après CHIRON et alii, 1996), mais aussi plus sophistiquée qu'en bruit car l'épidémiologie s'est emparée du sujet (BOUYER et alii, 1995) avec notamment la régression logistique dans le cadre du GLM, et ses raffinements associés comme l'analyse du risque et les rapports de cotes (*odds ratios*, *OR*). Cela consiste à prendre une situation d'exposition de référence (S_{ref} , souvent multivariée) et prendre comme sortie le rapport de cotes $(\frac{P(S)}{1-P(S)}) / (\frac{P(S_{ref})}{1-P(S_{ref})})$ ou le risque relatif (RR) $\frac{P(S)}{P(S_{ref})}$. Quand on fait varier l'exposition par une grandeur x égale à x_0 en S_{ref} , ces grandeurs de sortie ont la valeur 1 à l'origine $x = x_0$ et présentent différentes allures de croissance (Figures 7, d'après MEDINA et alii, 1994).

Figure 6 : Une loi d'impact en pollution (d'après CHIRON et alii, 1996)



Figures 7.1 et 7.2 : Diverses allures de variation pour le risque relatif RR (d'après MEDINA et alii, 1994)



Les lois d'impact à propos des effets du bruit et de la pollution de l'air ont ainsi des points communs et des différences. Un premier point commun réside dans la formulation de l'application %C(x) avec un modèle probabiliste. Les différences sont de plusieurs sortes ; sur le plan méthodologique et moyennant l'encadrement épidémiologique sanitaire, les consignes de construction en pollution sont bien plus standardisées au niveau international (CASSADOU et alii, 2002 ; MEDINA et alii, 1994) qu'elles ne le sont en bruit ; par ailleurs la recherche d'une expression analytique est plus poussée en bruit puisqu'en pollution on mentionne des intervalles de confiance pour les x_i de l'exposition. Dans le même temps, les raffinements de l'épidémiologie en terme d'analyse de risque introduisent de nombreux « facteurs » de variation dans les situations étudiées (Cf. 6.), et sur ce plan l'analyse du risque se révèle bien plus multiforme que la seule recherche de lois d'impact dans des conditions contrôlées univariées. On note aussi une grande différence en termes de grandeur de sortie, cela reste une grandeur avec les % (avec l'opportunisme du 4.2.), tandis que, dans le cas du risque, on travaille avec des rapports de telles grandeurs comme le nom l'indique, rapport de cotes ou risque relatif ; c'est ici la nature de la relation qui change.

Sur le plan pratique on rencontre facilement des %C qui dépassent les 60 % en gêne du bruit (c'est notamment pour cela que les premiers polynômes ont atteint en pratique le plafond des 100 %), alors qu'en matière sanitaire ils dépassent rarement les 10 % (Cf. Figures 3, 5 d'un côté, 6 de l'autre). On a aussi des différences analogues à propos des abscisses de ces courbes. Les grandeurs de source de la pollution et des doses sont des grandeurs ordinaires positives ou nulles tandis qu'en acoustique ce sont des niveaux de bruit de nature logarithmique dont le point d'origine serait $-\infty$, c'est-à-dire que l'on n'a jamais en acoustique le point de « *no drug* » contrairement à l'exposition à des gaz polluants ; il en résulte des conséquences quant à l'aspect visuel des graphes de ces lois.

En revanche, ces lois ont en commun qu'elles sont établies à partir d'exploitations des données recueillies à l'occasion d'études, et qu'elles n'ont guère encore atteint un degré de connaissance qui permette de les ranger actuellement comme des lois bien acquises et définitives.

5.3. LE CAS PARTICULIER DU CO

Parmi les gaz polluants de l'air, le monoxyde de carbone CO occupe une place à part avec une grandeur d'impact en terme d'effet et avec la loi d'impact qui en résulte. Il est assez bien établi en effet que la formation de carboxyhémoglobine HbCO qui résulte de l'action du CO sur l'hémoglobine est bien représentée par une équation différentielle du premier ordre à coefficients constants (CHOVIN, RICHALET, 1973) :

$$dy/dt + K(t)/k y = K(t) C(t) + K(t) H_{el}/k$$

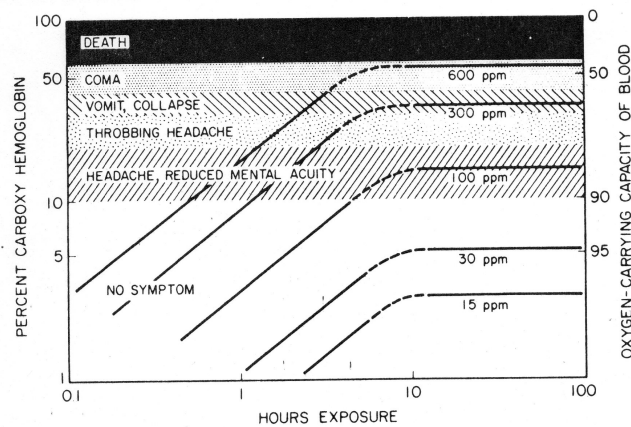
Dans cette équation, y est le taux de HbCO, $C(t)$ la teneur en CO respirée par le sujet, et k , K , H_{el} des paramètres physiologiques dont on connaît assez bien les valeurs numériques (et qui dépendent des individus) ; c'est ici un exemple où la grandeur d'impact y est un « effet » avec l'explicitation d'une grandeur *ad hoc* tout à fait pertinente.

Une équation de la forme $y' + a(t)y = b(t)$ est immédiate à résoudre, et l'on a ainsi les variations temporelles de l'impact y en fonction des variations temporelles de la grandeur de source C respirée et de la teneur y_0 à l'instant initial. Cela nous renvoie notamment à deux situations particulières et intéressantes en matière de solution d'une équation différentielle.

i) les coefficients a et b , ou K , H_{el} et C sont périodiques, ce qui est tout à fait réaliste sur 24 heures ou sur la semaine. Dans ce cas la solution générale $y(t)$ converge rapidement vers une solution particulière $y^*(t)$ périodique qui peut ainsi caractériser la réponse ou l'impact sur la période retenue (MAURIN, 1981), par exemple avec des situations périodiques types ;

ii) les coefficients de l'équation, et donc la teneur d'exposition au CO, sont des constantes. Il en résulte que, quelle que soit la valeur initiale y_0 , la solution générale $y(t)$ converge rapidement vers b/a , et l'on a par exemple des abaques avec des valeurs critiques pour le rapport b/a (Figure 8, JACOBSEN, 1971).

Figure 8 : Conséquences médicales directes de l'exposition au CO



Source : JACOBSEN, 1971

C'est un joli exemple où une technique mathématique à la fois simple, classique et bien connue, en même temps que différente des modèles probabilistes, des raffinements du scaling ou des développements du mesurage, est bien appropriée pour la formulation analytique d'un impact. On pourrait simplement regretter qu'une telle disposition favorable (physiologique et analytique) ne se présente pas plus souvent à l'occasion de pollutions plus importantes que celle due au CO à présent.

5.4. L'IMPACT VISUEL

Les exemples précédents font partie des « classiques » de l'environnement et des transports, les deux suivants sont plus originaux mais ils n'en concernent pas moins quelques uns des effets environnementaux résultant des infrastructures des transports.

i) Le premier concerne les effets visuels et leurs impacts qui sont dus à la présence des installations et à un certain caractère artificiel des paysages qui en résulte. La source de pollution est ici précisément la présence même d'un tel ouvrage quand il est bien identifiable (à la différence d'une pollution visuelle diffuse dans un espace urbain), et l'impact est le jugement esthétique, individuel ou collectif que l'on porte sur cette présence. L'étude de ce dernier est assez peu avancée et il n'est pas question ici de s'engager dans la définition d'un jugement porté sur la « nouvelle tache » visuelle. Ceci est réservé aux spécialistes du paysage, tout au plus peut-on faire remarquer que la question n'est pas aisée, par exemple avec l'historique de la Tour Eiffel largement mal jugée par l'opinion des intellectuels en pointe à ses débuts, sauvée de la démolition pendant la première guerre mondiale pour des raisons militaires, et quasi unanimement bien appréciée depuis. La difficulté est à l'image des opinions diverses comme « *celui qui croit [...] et celui qui n'y croit pas* » à la manière d'ARAGON. Et sachant aussi comment évolue la perception des groupes ou « forêts d'éoliennes » du temps présent (on évoque même la laideur), qu'en serait-il de 2, 3, 5 ou davantage ... Tours Eiffel sur le Champ de Mars à Paris ? En parallèle à tout cela, il y a aussi l'exemple du viaduc de Millau qui est plutôt très bien apprécié.

ii) Ici, nous nous limitons à la définition d'une grandeur de source objective qui ne puisse faire l'objet d'aucun malentendu, en sachant que l'on distingue la grandeur de source de la grandeur d'impact comme indiqué au début, et que l'on exclut toute confusion de genres comme celle des niveaux de bruit perçus ou d'une température ressentie ; techniquement, cette grandeur est à présent géométrique et non plus physique.

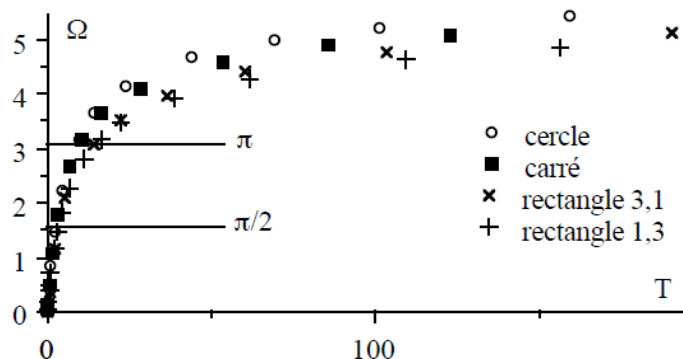
La vision d'un objet dans l'espace à trois dimensions repose sur les rayons lumineux qui vont de l'objet à l'œil. En géométrie projective, cet objet possède un contour qui limite la « tache » qu'il provoque, et tous les rayons appartiennent au cône de vision dont l'œil est le sommet et dont les rayons qui s'appuient sur le contour sont les génératrices. Dans le bagage des mathématiques quelquefois perdues de vue, le cône de vision peut être facilement mesuré par la notion d'angle solide. On introduit pour cela la sphère unité centrée sur l'œil et le plan tangent à la sphère dans une direction prise comme l'axe du cône. L'intersection du cône et du plan tangent correspond à la projection centrale ou gnomique (JOLY, BONNEROT, 1993). Elle a une aire T non bornée tandis que l'intersection du cône avec la sphère a une aire Ω qui ne peut dépasser l'aire de la sphère unité 4π . Par définition cette

aire Ω est l'angle solide sous lequel on voit l'objet en question, et il est exprimé en stéradians (le préfixe stéré désigne communément l'espace à trois dimensions mais à l'origine il s'agit du mot grec stereos « solide »).

Les points du contour de la tache visuelle figurant dans la demi-sphère qui est située devant l'observateur sont repérés par un angle θ pour la longitude variant de $-\pi$ à π (de la gauche à la droite) et un angle φ pour la latitude variant de $-\pi/2$ à $\pi/2$ (du bas vers le haut). Les aires Ω et T sont mesurées à partir du couple (θ, φ) et des formules de trigonométrie sphérique. Ces calculs sont relativement aisés pour des contours polygonaux de T, et notamment rectangulaires avec les valeurs $\theta_{\text{inf}} < 0$ et $\theta_{\text{sup}} > 0$, $\varphi_{\text{inf}} < 0$ et $\varphi_{\text{sup}} > 0$ (MAURIN, 1999). On rappelle qu'il y a aussi quelques formules classiques comme celle d'A. GIRARD qui donne l'angle solide d'un triangle sphérique (BASS, 1968).

Il s'avère en pratique que dans les cas de contours simples pour lesquels on sait calculer Ω et T, la correspondance $\Omega_{\text{cont}}(T)$ entre ces quantités est très proche de la relation exacte $\Omega = 2\pi(1 - \cos(\text{Arctg}(\sqrt{T/\pi}))) = 2\pi(1 - \sqrt{\pi/(T+\pi)})$ de la calotte sphérique jusqu'à $\pi/2$ et même π (Figure 9). Cette relation peut ainsi passer pour une « loi unique » de l'angle solide hémisphérique qui permet simplement de le calculer à partir de l'aire T de la tache dans le plan tangent de la projection centrale, laquelle est elle-même assez commode à calculer pour des contours polygonaux. Quant à sa validité pratique, un angle solide Ω égal à $\pi/2$ correspond à un cône circulaire de révolution d'angle au sommet de 42° , jusqu'à éventuellement 60° pour $\Omega = \pi$ (respectivement 2,44 et 9,42 pour l'aire T dans le plan tangent).

Figure 10 : Le « dévoilement » de la loi unique $\Omega(T)$
(pour l'hémisphère devant l'observateur)



Pour les taches à forme étoilée ou dendritique, il est aussi naturel, compte tenu de l'implantation dans le paysage, de remplacer le contour par son enveloppe convexe. Cela a pour effet de réduire son coefficient isopérimétrique, un coefficient qui est minimal et égal à 1 pour le cercle, égal à 1,287 pour le triangle équilatéral, 1,13 pour le carré et 1,30 pour le rectangle de côtés 1 et

3 (ces figures sont convexes) ; il est encore égal à 1,93 pour l'étoile régulière à 5 branches et seulement 1,075 pour le pentagone régulier qui est son enveloppe convexe (MAURIN, 1999). L'enveloppe convexe d'un contour nous ramène ainsi à de meilleures conditions de validité de la « loi unique » de l'angle solide ci-dessus.

iii) Il ne s'agit ici que de l'introduction d'une grandeur de source possible en termes de variable d'entrée pour une loi d'impact, en l'occurrence une variable géométrique objective. Bien entendu, il reste à introduire une grandeur d'impact qui représente l'effet produit et ressenti, avec probablement un « effet ARAGON » ou un « effet Tour Eiffel » à forte subjectivité qui nécessite une étude en propre. Encore une fois, cette autre étape est du ressort des spécialistes de l'impact visuel, et l'on ne peut qu'ajouter ici qu'au moment voulu il serait souhaitable de mettre en œuvre la technicité de la théorie du mesurage avec ses précautions et ses capacités d'adaptabilité à de nombreuses situations (les échelles de catégories du 4.3 par exemple).

Le cas d'une variable logique

La défiguration d'un paysage, ou son impact visuel, peut également être une question plus symbolique que géométrique. Dans ces conditions on peut caractériser la variable de source de cette pollution par une variable logique de présence $\{0, 1\}$, $\{\text{oui}, \text{non}\}$ ou $\{\text{présence}, \text{absence}\}$. C'est une autre sorte de grandeur de source objective, son calcul est bien entendu plus rapide que celui de l'angle solide, et l'on a noté que de telles variables interviennent en GLM, régression logistique et analyse du risque.

5.5. EFFET DE COUPURE ET MORCELLEMENT DE L'ESPACE RURAL

Un autre effet important des infrastructures de transport terrestre est la coupure que ces derniers font dans l'espace continu d'un seul tenant, avec un effet de coupure au voisinage de l'axe et un morcellement de l'espace en parties qui se retrouvent découpées (ici l'espace considéré est à deux dimensions, avec pour grandeur descriptive la superficie). Cet exemple ne considère que le morcellement des grandes étendues rurales ou forestières comme cela s'est produit en son temps pour la traversée de l'ouest de la Forêt de Fontainebleau par l'A6. Une certaine partie de l'opinion s'en était émue lorsque le massif des Trois Pignons a été séparé des « chers déserts » de SAINT-LOUIS par cette coupure autoroutière.

i) Un tel morcellement dérange des formes de vie animale sauvage et d'activités humaines agricole, sylvicole, pastorale... qui nécessitent une certaine étendue, et qui se trouvent handicapées par de nouvelles barrières venant limiter leur territoire et supprimer des déplacements et des itinéraires, sans compter différentes nuisances relatives à l'effet de lisière en bordure des axes avec des dépôts nouveaux de déchets, des destructions de zones

végétales et l'accroissement des territoires artificialisés (MAURIN, 1979).

Une liste complète de ces dégradations réelles ou potentielles de l'environnement est sans doute longue à établir. Quoi qu'il en soit, l'implantation d'une nouvelle coupure qui ici tient lieu de source de pollution provoque de telles dégradations, et c'est afin de proposer une solution formelle chargée d'en rendre compte que l'on peut introduire une « fonction valeur de l'espace » φ (autre notation qu'en 5.4.).

ii) Ici le morcellement de l'espace se traduit par le découpage d'une étendue d'un seul tenant de superficie s en deux nouvelles parcelles (elles-mêmes connexes) de superficies respectives s_1 et s_2 de sorte que $s_1 + s_2 = s$. Le triplet des variables géométriques (s, s_1, s_2) , ou le seul couple (s, s_1) , est une manière de caractériser objectivement la source de la pollution. Par conséquent, l'impact résultant peut être représenté par le déficit de valeur :

$\Delta = \varphi(s) - \{\varphi(s_1) + \varphi(s_2)\}$. Ainsi la définition de l'impact $\Delta\varphi(s, s_1, s_2)$ à partir d'une fonction valeur φ donne directement l'expression fonctionnelle générique de la loi d'impact en fonction des grandeurs géométriques en entrée, et que celle-ci est analytiquement explicite après que l'on s'est donné une expression précise pour φ . Cette modélisation conduit immédiatement au paradigme relationnel général « impact = $\Delta\varphi(s, s_1, s_2)$ » afin de représenter l'impact d'un milieu réceptif agressé par une coupure et une fragmentation en deux parties. C'est un autre exemple technique où l'on note comment sont liés les sorts de la grandeur d'impact et de la loi ; on peut aussi l'étendre naturellement au cas d'une nouvelle infrastructure terrestre au sein d'un réseau existant qui se traduit par le découpage de plusieurs parcelles connexes disjointes en deux fois plus de parcelles nouvelles.

Sur le plan technique, il est approprié de faire appel aux applications φ positives et sur-additives. Par définition, ces fonctions vérifient la propriété $\varphi(x + y) \geq \varphi(x) + \varphi(y)$ (MARSHALL, OLKIN, 1979) et la coupure conduit ainsi à un déficit positif de la valeur. Cette définition de l'impact permet des calculs simples et immédiats ; ainsi, avec les superficies des nouvelles parcelles s_1 et $s-s_1$, le déficit Δ est maximal pour $s_1 = s_2 = s/2$ ($d\Delta/ds_1 = -\varphi'(s_1) + \varphi'(s-s_1)$ s'annule pour $s_1 = s/2$). Quelques graphes de Δ pour $s = 1$, $s_1 = x.s$ et divers φ sont donnés en Figure 10.

iii) On peut aussi compléter et pénaliser l'effet de coupure avec des superficies utiles $s_u = s - \mu.P$ en faisant intervenir le périmètre P de la zone considérée et une bande en périphérie de largeur μ , pour tenir compte par exemple de l'emprise au sol des ouvrages et de l'effet de lisière. Cette pénalité est d'autant plus importante que le périmètre est élevé (on retrouve ici le coefficient d'isopérimétrie pour caractériser la forme), et ces nouvelles variables vérifient la relation $s_u = s_{u1} + s_{u2} + 2\mu.l > s_{u1} + s_{u2}$ avec une diminution de superficie utile qui dépend de la longueur l de la coupure dans l'espace

(Figure 11). Ce procédé complémentaire a l'avantage de poser aussi une pénalité pour une étendue non découpée en deux mais cependant pénétrée par une bretelle intérieure de longueur l' , avec comme nouvelle superficie utile $s_u' = s_u - 2 \mu.l'$ et le déficit $\Delta = \varphi(s_u) - \varphi(s_u')$ qui a ainsi sa propre expression fonctionnelle.

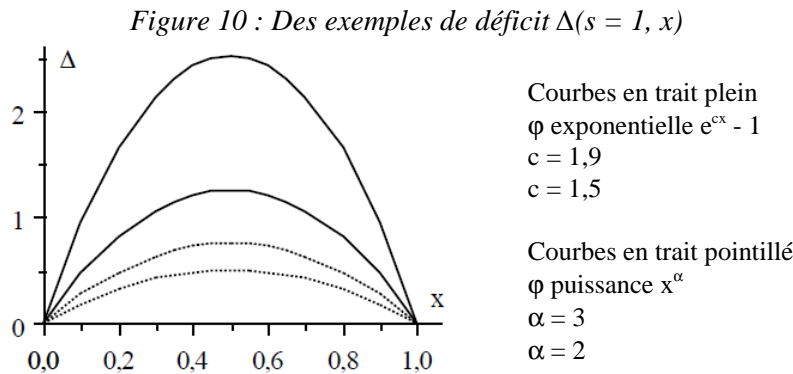
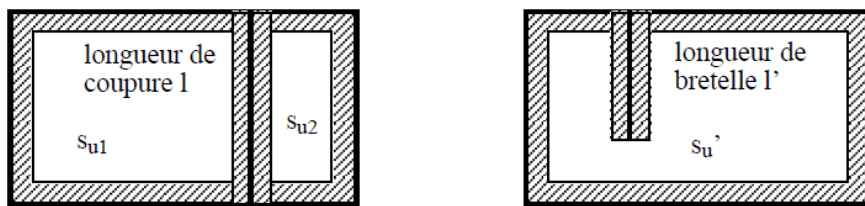


Figure 11 : Superficie utile, avec une largeur de bande périphérique μ



L'ensemble des fonctions sur-additives positives est vaste. Par exemple, si φ est une fonction étoilée (*star shaped*), positive croissante nulle à l'origine et vérifiant $\varphi(c.x) < c.\varphi(x)$ pour tout $0 < c < 1$, on a, pour c et c' positifs de somme 1, $\varphi(c.x) < c.\varphi(x)$, $\varphi(c'.x) < c'.\varphi(x)$ et donc $\varphi(c.x) + \varphi(c'.x) < \varphi(x)$. Les applications positives croissantes convexes sur \mathbb{R}^+ et nulles à l'origine sont étoilées, comme les puissances x^α ($\alpha > 1$) et les exponentielles $e^{cx} - 1$, avec $c > 0$; c'est aussi le cas des applications telles que $\varphi(x)/x$ est positive croissante sur \mathbb{R}^+ , et donc elles-mêmes positives et croissantes sur \mathbb{R}^+ .

iv) Dans cet exemple, comme avec celui de l'impact visuel, la variable d'entrée est de nature géométrique (au lieu d'être physique ou chimique comme auparavant), mais à la différence du visuel la forme de la relation est connue d'emblée à partir du moment où on la définit par le déficit de la fonction valeur qui résulte d'un morcellement d'étendue. Quoi qu'il en soit, il reste à donner la définition précise de la valeur et la manière dont celle-ci dépend des nombreux attributs de l'espace découpé, une valeur d'exploitation notamment mais aussi par exemple une valeur « sociale, culturelle, esthétique, symbolique » (DE MONTGOLFIER, 1975). Après le formalisme et les grandeurs d'entrée objectives, il s'agit à nouveau d'une étape qui est entièrement du ressort des spécialistes de l'espace et des multiples usages et

fonctions qu'il assume. L'hypothèse de sur-additivité n'est destinée qu'à produire un déficit positif (si c'est ce que souhaitent les spécialistes), elle est un autre exemple pour illustrer les ressources techniques que l'on peut mettre en œuvre afin d'explicitier des lois d'impact, et elle ne se substitue nullement à la réflexion qui doit conduire à l'évaluation de la valeur et de l'impact. Le formalisme de ce contexte laisse encore un vaste champ à parcourir aux thématiciens concernés afin d'introduire une grandeur d'impact pertinente et à portée opérationnelle.

Le cas d'un impact positif

Il peut aussi s'avérer que le découpage de l'espace présente un avantage, comme par exemple, a-t-on dit quelquefois, les coupures autoroutières qui ralentissent la progression de la rage dans la faune sauvage. Si tel est le cas, on peut introduire une fonction d'impact sous-additive ψ vérifiant $\psi(x + y) \leq \psi(x) + \psi(y)$ (MARSHALL, OLKIN, 1979 ; NELSEN, 1999), avec une valeur qui augmente et un déficit $\Delta\psi$ négatif à la suite d'une coupure. Plus généralement une somme $\phi + \psi$ avec son impact $\Delta\phi + \Delta\psi$ conduit à la même expression de la loi d'impact à partir du triplet (s, s_1, s_2) .

6. LES ASPECTS MULTIDIMENSIONNELS

Les exemples ci-dessus concernent des lois pour l'impact dû à une seule pollution et, bien entendu, il faut disposer de ces relations univariées. Cependant la situation actuelle, avec la montée en puissance des pollutions et de leur nombre, montre bien qu'il y a lieu de se soucier du contexte multinuisance et des impacts conjoints quand on est en présence simultanément de plusieurs mononuissances. Cette émergence du multinuisance est soulignée par exemple par les grands paniers d'indicateurs tels que PER, DPSIR, DPSEAA. De son côté, la récente étude COST 356 sur l'impact des transports sur l'environnement examine une grande panoplie de situations (JOURMARD, GUDMUNDSSON, 2010) et elle signale à juste titre que cela concerne l'intervention de nombreuses disciplines différentes. De cette manière on est ainsi conduit avant tout à une démarche d'inventaire (Cf. Figure 2). Si un vaste tour d'horizon est bien sûr nécessaire, ce mode est sensible à la dispersion des situations et leur juxtaposition ne permet guère à elle seule d'explicitier et de poser une structure commune avec suffisamment de recul.

Le multinuisance débouche sur la prise en compte de plusieurs impacts et, selon notre point de vue, la manière de l'aborder doit être une extension du cadre des nuisances individuelles, en conservant le même esprit. On entre ainsi dans le cadre des lois à plusieurs variables et, malgré une complexité accrue, il s'agit d'explorer de nouvelles possibilités de relations tout en s'efforçant de maintenir la pertinence (au sens du mesurage) de la loi pour un impact global résultant. C'est à n'en pas douter une démarche technique

nécessaire afin d'éviter des amalgames ou des chimères bien intentionnées mais mal façonnées.

6.1. LE GLM ET SES SUITES

Le modèle linéaire initial dû à LAPLACE, GAUSS, LEGENDRE implique d'emblée la prise en compte de plusieurs variables numériques X_i , $i = 1 \dots n$, sa généralisation en fait de même avec de nouvelles variables numériques ou non (les facteurs) et les utilisateurs de ces modèles ne se sont pas privés d'exploiter ces possibilités. Les modèles statistiques permettent de tester la significativité d'un facteur et dans l'analyse du risque en épidémiologie on peut examiner les influences respectives de chaque facteur ou de leurs combinaisons par rapport à une situation de référence. Le formalisme multidimensionnel existe donc bien de ce côté-là, mais il semble qu'en épidémiologie les nombreux facteurs sont des facteurs « accompagnant » une pollution particulière, et que l'on n'ait pas encore abordé la prise en compte conjointe de plusieurs pollutions distinctes.

6.2. LES LOIS DE HILL

Les lois de probabilité de HILL qui respectent la consigne « *no drug, no effect* » avec une grande commodité dans les relations dose-effet peuvent être étendues aux lois conjointes à plusieurs variables, toujours avec les fonctions de répartition sans utiliser de densités. Cela donne même lieu à une formulation en terme de copules (des fonctions de répartition particulières ainsi baptisées par FRÉCHET) (MAURIN, 2002). Le formalisme est en place.

6.3. UNE DÉMARCHÉ GLOBALE ET L'AGRÉGATION DES IMPACTS

Les éléments ci-dessus sont quelques extensions assez directes de techniques du 5., avec des interactions inhérentes à ces modèles. Cependant la prise en compte globale des impacts de plusieurs pollutions est aussi une question stratégique d'agrégation de données. Au sein d'un formalisme technique approprié, nous évoquons dans leurs grandes lignes la recherche d'un critère unique de synthèse et l'analyse multicritère (ROY, BOUYSSOU, 1993), en combinant des aspects techniques et des illustrations de plusieurs domaines.

6.4. SUR UN CRITÈRE UNIQUE DE SYNTHÈSE

A propos d'un critère unique il faut aborder la question de l'homogénéité des impacts, comme c'est le cas en économie avec l'unité monétaire autant qu'avec la grandeur plus abstraite de l'utilité. Ceci se retrouve aussi par exemple dans le milieu sportif avec divers régimes de mesure en nombre de « points acquis ». Il faut ensuite aborder les lois d'impact prises individuellement puis collectivement, et noter que leur rôle est comparable à celui des fonctions d'utilité qui ont pour objet de mesurer ou d'évaluer numériquement

l'utilité des objets considérés. Ces dernières sont également fondées sur des conditions axiomatiques (FISHBURN, 1973 ; ROY, BOUYSSOU, 1993) et ont de nombreux points communs avec la théorie du mesurage. Du côté du milieu sportif, on a l'exemple du décathlon qui associe dix épreuves différentes et qui a dû développer autant de « fonctions de points » additives dont la somme permet de désigner le vainqueur mais aussi le recordman (ces fonctions sont pérennes dans le temps). On a aussi l'exemple de l'heptathlon pour les femmes et celui du pentathlon dont certaines épreuves sont mixtes, avec des lois et des périmètres d'épreuves différents.

Il y a également la présence de termes d'interaction en sus de la seule additivité dans les sports par équipe. Pour les matchs de championnat de rugby, ce sont par exemple les points de bonus offensif ou défensif qui s'ajoutent aux points normalement obtenus en cas de victoire, de match nul ou de défaite. En football, la règle du *goal average* désigne le vainqueur d'un championnat, et dans certaines coupes les buts marqués à l'extérieur comptent double en cas d'ex-aequo après les matchs aller et retour.

6.5. AGRÉGATION ET COMBINAISON LINÉAIRE

En matière de nuisances et de pollutions, la démarche de l'agrégation doit naturellement rompre avec toute tentation de combinaison linéaire de lois d'impact mononuissances. En premier, la question de l'unité commune n'a pas été évoquée jusqu'à présent, et l'on ne peut donc les combiner telles quelles. Il faut d'abord se soucier de l'homogénéité telle qu'on la rencontre dans quelques domaines comme celui de l'empreinte écologique qui traduit ses concepts en équivalent de superficie, ou celui du potentiel de réchauffement des gaz à effet de serre en équivalent de CO₂. Ce pourrait être, à l'image d'une utilité économique ou des points dans le sport, une nouvelle grandeur comme une sorte de « gravité », « d'agressivité » environnementale ou encore de degré d'écotoxicologie en reprenant le néologisme de RAMADE. C'est là une grandeur moins tangible que celle de l'empreinte écologique, mais elle peut provenir des méthodes de la théorie de l'utilité ou de celle du mesurage avec les lois ou fonctions que ces théories révèlent, sachant qu'elles peuvent inclure des interactions quand il y a plusieurs variables en entrée.

A ce propos, le mesurage s'est rapidement développé en direction du « mesurage conjoint » initié par DEBREU et LUCE et TUCKEY (1964) afin d'appréhender les situations multidimensionnelles (ROBERTS, 1979 ; BOUYSSOU, PIRLOT, 2002). Quant au cas des réponses catégorielles, les intervalles successifs du 4.3. permettent à leur tour d'aborder les situations multidimensionnelles en explicitant des coefficients d'interaction (MAURIN, 2009).

Pour clore ce point, il est également d'autres objections à l'option d'une combinaison linéaire. Outre l'absence *a priori* d'interaction, il y a la difficulté de retenir des coefficients de pondération indiscutables. Cela nous ramène

incidemment sur la subjectivité dans l'expression de ces lois. En effet si les équivalents CO₂ sont établis sur des bases physiques en constante discussion entre les spécialistes (TUDDENHAM, 2009), des résultats classiques sur la séparation des ensembles convexes dans les espaces vectoriels montrent que l'on peut rendre toute situation {blanc} ou {noir} avec des choix appropriés de coefficients, d'une manière aussi « plaisante » que celle de la « justice [...] [de la] *rivière borgne* » de PASCAL (MAURIN, 2007). De la sorte des coefficients trop liés à un contexte local pourraient conduire à des règles d'agrégation linéaire picocholines, et nuire aux combinaisons ainsi proposées, à l'encontre d'une relative universalité telle qu'elle est recherchée par exemple par les observations en pollution de l'air (FONTELLE, 2010).

6.6. ANALYSE MULTICRITÈRE

L'analyse multicritère est un moyen performant d'éviter la somme de fonctions d'utilité et de désigner une solution dominante parmi plusieurs situations concurrentes multidimensionnelles, en jouant de manière algébrique (au sens de l'algèbre des ensembles et des relations binaires) avec des états d'indifférence, de préférence, d'incomparabilité entre les concurrents de la part d'un collectif de juges, et des relations algébriques d'équivalence, d'ordre, de surclassement pour les traduire. C'est le cas de la méthode ELECTRE déclinée sous plusieurs options pour désigner la situation qui l'emporte, ou un sous-ensemble de situations susceptibles de l'emporter comme n'étant surclassé par aucun autre, avec bien des finesses algébriques de gestion pour faire une agrégation de préférences (ROY, BOUYSSOU, 1993).

En matière environnementale, une adaptation consiste à en faire une aide à l'évaluation à la place d'une aide à la décision, en la greffant, comme le propose KEENEY, sur une analyse amont de l'arborescence des objectifs des partenaires environnementaux concernés (KEENEY, 1992 ; ROUSVAL, 2005 ; ROUSVAL, MAURIN, 2008 ; ROUSVAL, BOUYSSOU, 2009). A cette fin, la version retenue est ELECTRE-TRI et elle met en œuvre des « évaluateurs » au sens de fonctions d'évaluation qui permettent d'explicitier les relations algébriques ci-dessus. Un tel évaluateur joue ainsi un rôle analogue à celui des lois d'utilité ou d'impacts précédentes (au vocabulaire près) avec une grandeur d'impact en sortie. Ici cependant, suffixe TRI oblige, la grandeur de sortie doit être (à son tour) catégorisée si elle ne l'est déjà, ce qui fait appel à des lois prenant des valeurs nominales ou discrètes au lieu d'être continues ou rendues continues comme en 4. et 5. ; par exemple les effets médicaux de l'exposition au CO de la Figure 8 classés en six catégories. On a ainsi repris la loi d'impact dû au bruit de la Figure 5 pour en faire trois nouvelles classes d'arrivée, celle d'une croissance lente, celle d'une croissance rapide pour niveaux intermédiaires et forts, et celle de la saturation finale pour niveaux élevés. D'une manière intéressante les intervalles successifs ont ici permis de transformer un recueil initial de données à quatre catégories en une grandeur

d'impact à trois catégories finales. Dans ce cadre on a aussi utilisé les barèmes de pollutions ATMO pour quatre polluants (NO_2 , SO_2 , O_3 et le PM_{10} des poussières) avec des impacts classés en dix catégories (GARCIA et alii, 2001). Ce sont bien des lois d'impact avec une grandeur de sortie catégorisée qui sont impliquées dans un mécanisme de regroupement moyennant probablement, d'une manière implicite ou non, l'introduction d'une grandeur commune de « gravité » et d'équivalences entre classes. Pour ces lois, par ailleurs, les auteurs signalent quelques péripéties survenues au cours de leur construction (nombre de classe, ordre de numérotation, finalement à l'opposé de la numérotation plus usuelle qui donne la note la plus grande à la meilleure production).

Cet éventail particulier de pollutions prises en compte au cours d'une mise en œuvre d'ELECTRE-TRI, les considérations sur les fonctions d'utilité ou le mesurage conjoint montrent l'étendue des thématiques autour d'une problématique environnementale ainsi que la nécessité de développer des outils assimilables à des lois d'impact.

7. QUELQUES CONCLUSIONS

Les lois d'impact ou de réponse constituent une étape importante dans la construction des outils d'information qui concernent l'impact provoqué par les pollutions sur l'environnement. Ces outils prennent tout leur sens après que l'on a fait la distinction entre les grandeurs d'exposition en entrée et les grandeurs d'impact en sortie. Cela permet notamment d'éviter toute confusion éventuelle entre les deux et de « mesurer » ainsi une exposition avec le point de vue de l'impact qui en résulte.

En amont, c'est le mérite d'une approche structurée de l'impact dans son ensemble que d'identifier les notions de grandeur d'impact et de relation entre pollution et impact. La définition d'une grandeur d'impact est une analyse en soi de la part des spécialistes concernés ; c'est à eux qu'il incombe la charge de caractériser un impact, et il revient à la loi ou relation de traduire l'effet d'une pollution dans les termes de cette grandeur. La nature de la loi dépend naturellement des définitions respectives des variables d'entrée et de sortie qui sont retenues et l'on voit bien leur sort sont liés. Ils le sont notamment sous l'angle de la syntaxe et du formalisme associé, et dans ce cadre il faut tirer profit de toutes les opportunités qui sont offertes. Cela peut être du niveau des ressources habituelles (en évitant des pratiques simplistes cependant), ou bien du niveau de connaissances « *quelque peu délaissé[es] et méconnu[es] [...] dans quelque-arrière salle du magasin mathématique* » (LE LIONNAIS, 1962). Pour la recherche en matière environnementale, on a là l'occasion d'un challenge scientifique original et passionnant d'une manière générale, et d'autant de challenges particuliers qu'il y a de situations et de grandeurs d'impact qui se présentent. Et dans le cadre des transports, ces lois

sont naturellement en aval des modélisations, simulations ou recueils de la mobilité qui pour leur part permettent de fournir les grandeurs de source de pollutions des transports.

On ne peut éviter, a-t-on noté, la question de la numérisation de la grandeur d'impact, une question qui hante plusieurs disciplines (MARTIN, 1997 ; MICHELL, 1990) et à propos de laquelle certains évoquent un exercice entre « *l'Art et la Science* » (ANNETT, 2002). C'est au départ une question thématique pour le spécialiste des thèmes considérés, sans doute la réponse à une attente qu'il éprouve, mais une réponse qui pour autant se doit (devrait) de passer par le respect des règles syntaxiques. La recherche d'une réponse à apporter, rigoureuse naturellement, contribue précisément à l'aspect passionnant des challenges ci-dessus.

Une autre chose à ne pas perdre de vue est le temps de la genèse d'une loi ; les lois physiques les plus banalisées d'aujourd'hui n'ont pas toujours existé, il n'y avait pas de loi de la gravitation avant NEWTON, ni de l'électromagnétisme avant le collectif COULOMB, AMPÈRE, FARADAY et MAXWELL, etc. Ces lois, et d'autres, ont eu leur temps d'élaboration avec des heures de tâtonnements, « *des siècles ou des millénaires* » (ULLMO, 1969), avec aussi des états « *puérils et mondains* » (BACHELARD, 1938). Il n'est donc pas étonnant que chaque loi d'impact que l'on est amené à considérer ne soit pas d'emblée bien établie, et dans la plupart des cas il s'agit encore de « *voir l'étendue des travaux qui restent à mener* » (ROUSSEL et alii, 2010).

Une déclaration de la sorte qui reconnaît que beaucoup de choses restent encore à faire est en passe de devenir une antienne dans le contexte environnemental, à la suite par exemple de RAMADE (1977), du rapport FICON (1992), de MOMAS et alii (2004) et de ROUSSEL et alii (2010), en reprenant ainsi le « *vingt fois sur le métier* » de BOILEAU. L'émergence de nouveaux effets et la complexité des phénomènes qui peuvent en découler « densifient » en effet les questions qui se posent pour leur juste évaluation et pour les solutions à leur apporter, et cela concerne les transports autant que beaucoup d'autres secteurs d'activité. Il faut pour cela adopter une attitude posée et rationnelle (RAMADE, 1977) et en suivant une telle option il n'est pas inintéressant de prospecter les opportunités existantes ou en cours de développement qui se prêtent à cet exercice, en combinant l'à-propos, la curiosité et l'originalité et l'esprit de rigueur. Cela traverse les thématiques et les métiers concernés par les nombreux effets subis par l'environnement, et cela peut représenter un bon gage d'avancement et de sérieux pour cette nouvelle problématique devenue incontournable.

REMERCIEMENTS : L'auteur est reconnaissant auprès des relecteurs qui ont lu le projet d'article avec une grande attention, et qui lui ont ainsi permis d'apporter des corrections, précisions et compléments pertinents.

BIBLIOGRAPHIE

- ADAMS E., MESSICK S. (1958) An axiomatic formulation and generalisation of successive intervals scaling. *Psychometrika*, Vol. 23, n° 4, pp. 355-368.
- AGRESTI A. (1990) *Categorical Data Analysis*. New York, J. Wiley and sons.
- ANNETT J. (2002) Subjective rating scales: science or art? *Ergonomics*, Vol. 45, n° 14, pp. 966-987.
- BACHELARD G. (1938) *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Vrin.
- BASS J. (1968) *Cours de mathématiques, tome I*. Paris, Masson.
- BOTTELDOOREN D., LERCHER P. (2004) Noise annoyance modeling: the Devil is in the Average. *ICA 2004*, pp. IV - 2631-34.
- BOUYER J., HEMON D., CORDIER S., DERRIENIC F., STRÜCKER I., STENGEL B., CLAVEL J. (1995) *Epidémiologie, Principes et méthodes quantitatives*. Paris, Editions de l'Inserm.
- BOUYSSOU D., PIRLOT M. (2002) Nontransitive decomposable conjoint measurement. *Journal of Math. Psych.*, Vol. 46, pp. 677-703.
- BURR I.W. (1968) On a general system of distributions III - the sample range. *Journal of the American Statistical Society*, Vol. 63, pp. 636-643.
- CASSADOU S. et alii (2002) *Programme de surveillance Air et Santé 9 villes, surveillance des effets sur la santé liés à la pollution atmosphérique en milieu urbain - phase II*. Ministère de l'écologie et du développement durable, PSAS-9, Institut de veille sanitaire.
- CHARDEY S. (1988) Méthode française d'élaboration d'un plan d'exposition au bruit. *Revue Générale des Routes et Aérodromes*, n° spécial Aérodromes.
- CHIRON M., DONATI J., FESTY B., QUÉNEL P., ZMIROU D. (1996) *La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique*. SFSP.
- CHOVIN P., RICHALET J. (1973) Etude théorique de la cinétique de la fixation du monoxyde de carbone sur l'hémoglobine du sang. *Ann. Fals. exp. chim.*, n° 710, pp. 177-189.
- DE MONTGOLFIER J. (1975) Autoroute ou forêt ? *Futuribles*, n°1-2, pp. 41-59.
- DUHEM P. (1997) *La théorie physique*. Paris, Vrin (réédition).
- FEDERAL INTERAGENCY COMMITTEE ON NOISE (FICON) (1992) *Federal agency review of selected airport noise analysis issues*.
- FEYNMAN R. (1980) *La nature de la Physique*. Paris, Seuil.

FISHBURN P.C. (1973) *Les mathématiques de la décision*. Paris, Mouton/Gauthier-Villars.

FONTELLE J-P. (2010) Le compte des mille et ... inventaires. *Pollution atmosphérique*, numéro spécial, pp. 41-48.

FOX-KELLER E. (2007) Physique et biologie, deux façons de penser le monde. *La Recherche*, n° 407.

FROMENT G. (1987) *Détermination des concentrations et doses admissibles environnementales pour les polluants atmosphériques*. Lyon, Thèse UCB Lyon 1, INRETS-LESCO.

GARCIA J., COLOSIO J., JAMET Ph. (2001) *Les indices de qualité de l'air*. École des Mines de Paris.

GOGER T. (2006) *Un indicateur d'impact environnemental global des polluants atmosphériques émis par les transports*. Lyon, Thèse de Doctorat de Chimie, INSA de Lyon.

GOUTELLE S., MAURIN M., ROUGIER F., BARBAUT X., BOURGUIGNON L., DUCHER M., MAIRE P. (2008) The HILL equation: a review of its capabilities in pharmacological modelling. *Fundamental and Clinical Pharmacology*, Vol. 22, n° 6, pp. 633-648.

HILL A.V. (1910) The possible effects of the aggregation of the molecules of hæmoglobin on its dissociation curves. *J. Physiol.*, 40, pp. iv-vii.

HOLFORD H.G., SHEINER L.B. (1981) Understanding the dose-effect relationship: clinical application of pharmacokinetic-pharmacodynamic models. *Clinical pharmacokinetics*, Vol. 6, pp. 429-453.

JACOBSEN W.E., (1971) *Automated Emissions; A Technology Assessment Methodology*. Washington, D.C., Mitre Corp.

JOLY F., BONNEROT G. (1993) La cartographie. *Encyclopaedia Universalis*, Corpus 5.

JOUMARD R., GUDMUNDSSON H. (éd.) (2010) *Indicators of environmental sustainability in transport: an interdisciplinarity approach to methods*. COST 356-INRETS report.

KEENEY R. L. (1992) *Value-focused thinking*. Harvard University Press.

LARGEAULT J. (1993) Description et explication. *Encyclopaedia Universalis*, vol 7.

LE LIONNAIS F. (1962) Les mathématiques et les sciences de la nature. In F. LE LIONNAIS (éd.) *Les grands courants de la pensée mathématique*. Paris, A. Blanchard, pp. 389-392.

LEROND M., LARRUE C., MICHEL P., ROUDIER B., SANSON C. (2003) *L'évaluation environnementale des politiques, plans et programmes*. Paris, TEC&DOC.

LIÉNARD P. (1978) *Décibels et indices de bruit*. Paris, Masson.

LUCE R.D., EDWARDS W. (1958) The derivation of subjective scales from just noticeable differences. *Psychological Review*, Vol. 65-4, pp. 222-237.

LUCE R.D., GALANTER E. (1963) Discrimination, Psychophysical scaling. In R.D. LUCE, R.R. BUSH, E. GALANTER *Handbook of mathematical psychology*, New York, J. Wiley and sons, Vol. 1, pp. 193-243 et 244-307.

LUCE R.D., TUCKEY J.W. (1964) Simultaneous conjoint measurement, a new type of fundamental measurement. *Journal of Math. Psychol.*, Vol. 1, pp. 1-27.

MC CULLAGH P., NELDER J.A. (1989) *Generalised linear models*. Londres, Chapman and Hall (2ème éd.).

MARSHALL AW., OLKIN I. (1979) *Inequalities: theory of majorization and its application*. Waltham, Academic Press.

MARTIN O. (1997) *La mesure de l'esprit*. Paris, L'Harmattan.

MAURIN M. (1979) *Effet de coupure et morcellement de l'espace naturel*. Bron, IRT-CERNE NN 34.

MAURIN M. (1981) *Modélisation de la réponse physiologique à l'exposition au monoxyde de carbone*. Bron, rapport IRT-CERNE NNP 66.

MAURIN M. (1999) *L'impact visuel et le calcul de l'angle solide*. Bron, INRETS-LTE n° 9918 (version 2006).

MAURIN M. (2002) Lois conjointes et copules de HILL. XXXIV-ème *Journées de Statistique*, Bruxelles Louvain-la-Neuve.

MAURIN M. (2003) Réflexions à propos des relations numériques entre le bruit des transports et la gêne exprimée. *RTS*, n° 78, pp. 63-77.

MAURIN M. (2005) The sinuous progression of impact magnitudes and impact laws in environmental acoustics. *ICSV 12*, july, Lisbonne.

MAURIN M. (2006a) *Les indicateurs d'impact sur l'environnement et leur approche structurelle*. Bron, note INRETS-LTE-PIE (version sept. 2009).

MAURIN M. (2006b) *Les indicateurs d'impact sur l'environnement, complément sur les paniers d'indicateurs et les lois d'impact ou de réponse*. Bron, note INRETS-LTE-PIE (version fév. 2009).

MAURIN M. (2006c) L'évolution des systèmes d'indicateurs en environnement. *2nd conf. Environment & Transport, incl. 15th conf. Transport and Air Pollution*, Reims.

MAURIN M. (2007) *Pour une construction formelle d'indice global agrégé en pollution de l'air*. Bron, note INRETS-LTE (version oct. 2010).

MAURIN M. (2008) *Sur sept péchés mignons en acoustique environnementale*. Bron, note INRETS-LTE (version fév. 2010).

MAURIN M. (2009) Lorsque l'utilité, la gêne ou le confort sont recueillis sur une échelle de catégories : l'interaction dans le contexte multivarié. *Mathématiques et Sciences humaines*, n° 188, pp. 5-39.

MAURIN M., ROUGIER F., MAIRE P. (2000) *Note de calcul sur les lois de Hill, aspects probabilistes, déterministes et épistémologiques*. Hôpital A. Charial - INRETS-LTE n° 2026.

MEDINA S., LE TERTRE A., QUÉNEL P., LE MOULLEC Y. (1994) *Évaluation de l'impact de la pollution atmosphérique urbaine sur la santé en Île-de-France 87-92*. Observatoire régional de santé d'Île-de-France.

MEYNARD L. (1958) *Logique et philosophie des sciences*. Paris, Eugène Belin.

MICHELL J. (1990) *An introduction to the logic of Psychological Measurement*. Hillsdale, L. Erlbaum Associates.

MIEDEMA H.M.E., VOS H. (1998) Exposure-response relationships for transportation noise. *J. Ac. Soc. of America*, Vol. 104, n° 6, pp. 3432-3445.

MIGNERON J.G. (1980) *Acoustique urbaine*. Paris, Masson.

MOMAS I., CAILLARD JF., LESAFFRE B. (2004) *Rapport de la commission d'orientation du plan national santé environnement*. AFSSC.

NELSEN R.B. (1999) *An introduction to copulas*. New York, Springer.

OLIVA C. (1993) Gêne due au bruit des avions dans le voisinage des aéroports internationaux suisses. *Médecine et Hygiène*, n° 51, pp. 1806-1808.

OMNÈS R. (1994) *Philosophie de la science contemporaine*. Paris, Gallimard (coll. Folio).

PARAIN-VIAL J. (1981) Introduction. In J. PARAIN-VIAL *Les difficultés de la quantification et de la mesure*. Paris, Maloine S-A.

PERSONNE M., BRODHAG C. (1999) *Évaluation des performances environnementales des PME*. Paris, Techniques de l'Ingénieur, G 5 100.

RAMADE F. (1977) *Écotoxicologie*. Paris, Masson.

ROBERTS F.J. (1979) *Measurement theory*. Reading, Addison-Wesley.

ROSS A. (2006) *Les mathématiques et la représentation du réel*. http://newton.mat.ulaval.ca/amq/bulletins/mars06/Copernic_Ross.pdf.

ROUSSEL I., CHARLES L., RAMBAUD J-M. (2010) L'évaluation et la perception de l'exposition à la pollution atmosphérique : une interrogation sociétale. *Pollution Atmosphérique*, n° 205, pp. 67-79.

ROUSVAL B. (2005) *Aide multicritère à l'évaluation de l'impact des transports sur l'environnement*. Paris, Thèse de doctorat, Univ. Paris-Dauphine.

ROUSVAL B., BOUYSSOU D. (2009) De l'aide multicritère à la décision à l'aide multicritère à l'évaluation. *Cahier du Lamsade*, n° 293.

ROUSVAL B., MAURIN M. (2008) Evaluations de l'impact des transports sur l'environnement, quels modèles utiliser ? *RTS*, n° 100, pp. 169-184.

ROY B., BOUYSSOU D. (1993) *Aide multicritère à la décision : méthodes de cas*. Paris, Economica.

SCHULTZ T.J. (1978) Synthesis of social surveys of noise annoyance. *J. Ac. Soc. of America*, Vol. 64, n° 2, pp. 377-405.

SMITH M.J.T. (1990) Do we really need 57 ways of rating aircraft noise? *Internoise*, Vol. 90, pp. 467-470.

STEVENS S.S. (1971) Issues in psychophysics. *Psychological review*, Vol. 78, n° 5, pp. 426-450.

SUPPES P., ZINNES J.L. (1963) Basic measurement theory. In R.D. LUCE, R.R. BUSH, E. GALANTER *Handbook of mathematical psychology*, New York, J. Wiley and sons, Vol. 1, pp. 1-76.

TARANTOLA A., MERCERAT D. (sd) Géophysique théorique.
www.ipgp.jussieu.fr/rech/ModTom/Francais/GEOTHEO/GeoTheo.html.

TORGERSON W.S. (1958) *Theory and methods of scaling*. New York, J. Wiley and sons.

TUDDENHAM M. (2009) Le fluorure de sulfuryle SO₂F₂ : les connaissances de ce nouveau GES s'affinent. *Pollution atmosphérique*, n° 202, p. 171.

ULLMO J. (1969) *La pensée scientifique moderne*. Paris, Flammarion.

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (1975) *A guidance manual for the assessment of physical impacts due to highway facility improvements*.

VALLET M. (1996) *Caractéristiques et indicateurs de la gêne due au bruit des avions*. Bron, Synthèse INRETS n° 29.

VAN DEN BERG M. (1999) *Position paper on EU noise indicators*. EC DG-XI.

ARAGON L. (1941) *La rose et le réséda* ; BOILEAU P. (1674) *Art poétique, chant I* ; HUGO V. (1855) *Les Contemplations, Volume I Autrefois, Livre I l'Aurore, poème VIII* ; PASCAL B. (1710) *Les pensées* ; VERLAINE P. (1866) *Poèmes Saturniens, Mon rêve familial*.