

Table des matières

I	Topologie	5
I.1	Motivations, vue d'ensemble	5
I.2	Distance, espace métrique	7
I.3	Topologie des espaces métriques, vocabulaire de base	9
I.4	Suites	13
I.5	Complétude	15
I.6	Compacité	16
I.7	Applications entre espaces métriques	19
I.8	Théorème de point fixe de Banach	20
I.9	Compléments sur les espaces vectoriels normés	21
I.10	Espaces vectoriels normés de dimension infinie	24
I.11	Exercices	26
II	Calcul Différentiel	31
II.1	Dérivées partielles, notion de différentielle	31
II.1.1	Définitions, premières propriétés	31
II.1.2	Compléments	37
II.1.3	Théorème fondamental de l'analyse	41
II.2	Exercices	42
II.3	Théorèmes des fonctions implicites et d'inversion locale	47
II.4	Exercices	52
II.5	Dérivées d'ordre supérieur	55
II.5.1	Dérivées partielles d'ordre supérieur pour les fonctions scalaires	55
II.5.2	Différentielles d'ordre supérieur pour les fonctions de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^m	58
II.6	Éléments d'analyse fonctionnelle	59

II.7 Exercices	61
III Mesure et intégration	63
III.1 Motivations, vue d'ensemble	63
III.2 Tribus, espaces mesurables	68
III.2.1 Tribus	68
III.2.2 Applications mesurables	71
III.2.3 Classes monotones	72
III.3 Mesures	74
III.4 Mesures extérieures	78
III.4.1 Définitions, premières propriétés	78
III.4.2 D'une mesure extérieure à une mesure	79
III.4.3 Mesure de Lebesgue	81
III.5 Compléments	84
III.6 Exercices	87
III.7 Fonctions mesurables, intégrale de Lebesgue	91
III.7.1 Fonctions mesurables	91
III.7.2 Intégrale de fonctions étagées	94
III.7.3 Intégrale de fonctions mesurables	97
III.7.4 Théorèmes fondamentaux	100
III.8 Intégrales multiples	102
III.9 Changements de variable	107
III.10 Les espaces L^p	108
III.10.1 L'espace $L^\infty(X)$	109
III.10.2 Les espaces $L^p(X)$, pour $p \in [1, +\infty[$	110
III.10.3 Les espaces $L^p(\mathbb{N}) = \ell^p$ et $L^p(\mathbb{R}^d)$	112
III.11 Compléments	114
III.12 Exercices	115
IV Fondamentaux et compléments	121
IV.1 Fondamentaux	121
IV.1.1 Éléments de théorie des ensembles	121
IV.1.2 Structures fondamentales	123

IV.1.3	Cardinalité	124
IV.1.4	L'ensemble des réels : construction et structures afférentes	126
IV.1.5	Inégalités fondamentales	131
IV.2	Pour aller plus loin (●●●●)	133
IV.2.1	Théorie des ensembles, cardinalité	133
IV.2.2	Complété d'un espace métrique (●●●●)	133
IV.2.3	Topologie générale (●●●●)	134
V	Développements	137
V.1	Éléments d'optimisation	137
V.1.1	Définitions, conditions nécessaires / suffisantes d'optimalité	137
V.1.2	Contraintes non linéaires d'égalité	139
V.2	Entiers p -adiques	141
V.3	Distance de Gromov-Wasserstein	149
V.4	Dualité, convergence faible	151
V.4.1	Éléments d'analyse fonctionnelle	151
V.4.2	Dualité	151
VI	Corrigés des exercices	155
VI.1	Topologie	155
VI.2	Calcul Différentiel	165
VI.3	Mesure et Intégration	179

Chapitre I

Topologie

Sommaire

I.1	Motivations, vue d'ensemble	5
I.2	Distance, espace métrique	7
I.3	Topologie des espaces métriques, vocabulaire de base	9
I.4	Suites	13
I.5	Complétude	15
I.6	Compacité	16
I.7	Applications entre espaces métriques	19
I.8	Théorème de point fixe de Banach	20
I.9	Compléments sur les espaces vectoriels normés	21
I.10	Espaces vectoriels normés de dimension infinie	24
I.11	Exercices	26

I.1 Motivations, vue d'ensemble

Les sections qui suivent portent pour l'essentiel sur des questions de topologie dite métrique, c'est-à-dire sur la manière dont une *distance* structure un ensemble. Cette notion est très intuitive, du fait que la distance euclidienne de l'espace physique \mathbb{R}^3 , ou tout du moins l'ordre de grandeur de la distance entre deux objets, est directement accessible aux sens. Il est néanmoins intéressant, y compris pour appréhender le monde réel, d'aborder cette notion d'un point de vue général, abstrait. En effet, la modélisation d'un très grand nombre de phénomènes réels repose sur la définition d'une métrique adaptée. Ce rôle central joué par la métrique s'est encore accru ces dernières années avec l'explosion de la science des données. Nous décrivons ci-dessous quelques exemples de situations dans lesquelles une part essentielle de la démarche réside dans la définition d'une distance adaptée, en nous limitant aux 3 grandes classes de contextes qui nous paraissent essentielles.

1) En premier lieu une distance a vocation à structurer un espace donné, et sa définition dépend du regard que l'on souhaite porter sur cet espace, et des facteurs que l'on souhaite prendre en compte. Ainsi, pour deux points d'une zone géographique représentée sur un plan, la distance euclidienne canonique correspond à la distance "à vol d'oiseau" du langage commun. Mais si l'on s'intéresse à une notion de proximité respectueuse de la difficulté effective de se rendre d'un point à un autre, il peut être pertinent de privilégier par exemple le temps qu'il faut pour se rendre du point x au point y , selon une modalité donnée, en prenant en compte les contraintes associées à la topographie du terrain. Un exemple archétypal de cette approche est la célèbre *distance de Manhattan*, appelée aussi *distance du*

chauffeur de taxi, adaptée à une zone géographique dans laquelle les axes de circulation sont structurés en réseau orthogonal. À l'échelle d'un pays comme la France, il peut être fécond de définir la distance entre deux points comme le temps minimal qu'il faut pour aller d'un point à un autre en utilisant les transports en communs (complétés par de la marche à pied au départ et à l'arrivée). L'espace métrique associé (ce terme est défini plus loin, il s'agit simplement de la carte munie de la distance que l'on vient de définir) est difficile à représenter graphiquement, mais il est une représentation plus fidèle et féconde du territoire si l'on s'intéresse à la manière dont le réseau de transport structure l'espace. On pourra considérer par exemple le "disque" (dont la forme peut être très éloignée de l'image que l'on se fait d'un disque) centré en la position d'une entreprise et de rayon une demie-heure, qui couvrira la zone dans laquelle habiteront les salariés qui souhaitent garder leur temps de déplacement journalier en dessous de cette durée. On pourra aussi considérer la distance associée au temps de parcours sur route, et s'intéresser par exemple à la part du territoire constituée des points situés à moins d'une demie-heure d'un hôpital ou d'une maternité. Ce type d'approche conduit assez naturellement à des problèmes délicats d'optimisation, comme par exemple : comment positionner de façon optimale des centres de soin dans un territoire de façon à minimiser la distance (= temps) maximale pour se rendre dans l'un de ces centres ? Ces problèmes complexes et la forme de leurs solutions dépendent étroitement de la distance choisie.

2) Une distance a également vocation à quantifier une différence, un écart, entre deux entités de même nature. Prenons l'exemple d'une collection d'images. Une image (disons carrée, et en noir et blanc) d'une résolution donnée peut être vue comme une matrice $N \times N$ de valeurs de l'intervalle $[0, 1]$ (niveaux de gris). La proximité entre deux images (par exemple parmi des images représentant des formes géométriques, ou des objets de la vie courante) peut être estimée assez efficacement par un enfant de 3 ans, mais il est extrêmement délicat de définir une métrique adaptée à cette situation, et la réponse peut dépendre du type d'images que l'on considère. On pourra se convaincre rapidement qu'identifier des images à des vecteurs de $[0, 1]^{N^2}$, et utiliser la distance euclidienne standard sur \mathbb{R}^{N^2} , est très loin d'être pertinent. Dans un contexte différent, on peut penser à une population d'individus à laquelle on associe un vecteur de caractéristiques (poids, âge, taille, taux de diverses substances dans le sang, ...). Structurer la population en catégories pertinentes passe par la définition d'une distance : peut-on associer à tout couple de personnes (représentées ici par leurs vecteurs de paramètres) un nombre qui quantifie leur éloignement ? Là encore une réponse pertinente à cette question peut être assez éloignée de la distance euclidienne. Un écart de 2 mois entre individus peut ainsi être considéré comme plus significatif s'il s'agit de nouveaux-nés que s'il s'agit d'adultes en pleine force de l'âge. Il peut être aussi pertinent de prendre en compte des couplages forts entre composantes, ce que la distance euclidienne ne permet pas. À titre d'exemple, une différence de poids de 5 kg est plus significative pour des nouveaux-nés que pour des quinquagénaires. Ces questions sont également cruciales dans le contexte de l'apprentissage statistique supervisé : l'apprentissage passe par une étape de minimisation d'une fonctionnelle de coût (appelée fonction *loss*), basée sur la définition d'une distance entre ce qui est produit par la fonction prédictive et la sortie provenant des données labellisées de la base d'apprentissage, et l'efficacité de l'approche repose en grande partie sur le choix de la distance.

3) L'expression des lois de la physique (systèmes de particules, mécanique des fluides, du solide, électromagnétisme, mécanique quantique), ou la modélisation de phénomènes réels (en biologie, dynamique des populations, économie, ...) conduit à des équations différentielles ordinaires (EDO) ou à des équations aux dérivées partielles (EDP), qui font intervenir dans le premier cas (EDO) des fonctions d'un intervalle en temps dans \mathbb{R}^d , dans le second cas (EDP) des fonctions à la fois du temps et d'une variable d'espace dans \mathbb{R}^d . L'analyse théorique de ces équations nécessite une structuration de l'espace dans lequel vivent leurs solutions. Il s'agit d'espaces de dimension infinie¹ sur lesquels il s'agit de définir une distance. On choisit en général une distance qui respecte la structure linéaire, construite à partir de ce que l'on appellera une *norme*. L'étude de tels espaces, qui constitue ce que l'on appelle l'*Analyse Fonctionnelle*, repose sur les notions qui sont introduites dans les sections qui suivent (espace vectoriel

1. On ne peut par exemple pas décrire l'ensemble des fonctions continues d'un intervalle en temps $[0, T]$ dans \mathbb{R}^d comme combinaison linéaire d'un nombre fini de fonctions particulières. C'est encore pire, si l'on ose dire, dans le cas des EDP, où l'on est amené à considérer, par exemple pour représenter un champ scalaire dynamique comme une température, des applications de $\mathbb{R} \times \mathbb{R}^d$ dans \mathbb{R} .

normé, ouverts et fermés, suites, complétude, compacité).

Dans un contexte plus directement lié aux sciences de l'ingénieur, la résolution numérique des problèmes de type EDO ou EDP mentionnés ci-dessus passe par des approximations : on effectue ce que l'on appelle une *discrétisation* du temps, en subdivisant l'intervalle continu en petits tronçons, qui vont permettre de transformer le problème de départ, qui est en dimension infinie, en un problème en dimension finie. Une approche analogue est faite en espace dans le cas des EDP². Étudier ces méthodes d'approximation (ce qu'on appelle l'*Analyse Numérique*) consiste à montrer que les solutions approchées *convergent* vers la solution exacte de l'équation. Cette dernière vivant dans un espace de dimension infinie, sur lequel toutes les normes ne sont pas équivalentes, le choix de la norme conditionne encore de façon essentielle la nature du résultat de convergence.

I.2 Distance, espace métrique

Notions principales : distance, espace métrique, boules ouvertes et fermées, sphères, norme, espace vectoriel normé.

Définition I.2.1. (Distance, espace métrique (•))

Soit X un ensemble. On appelle distance (ou métrique) sur X une application de $X \times X$ dans \mathbb{R}_+ vérifiant les propriétés suivantes :

- (i) (*Séparation*) Pour tous x, y dans X , on a $d(x, y) = 0 \iff x = y$.
- (ii) (*Symétrie*) $d(x, y) = d(y, x)$ pour tous x, y dans X .
- (iii) (*Inégalité triangulaire*) Pour tous x, y, z dans X , on a

$$d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z).$$

Le couple (X, d) est appelé espace métrique.

Exercice I.2.1. (•) On considère l'ensemble fini $\llbracket 1, N \rrbracket$, pour N entier ≥ 1 . À une distance sur X on peut associer une matrice carrée $D = (d_{ij}) \in \mathcal{M}_N(\mathbb{R})$, avec $d_{ij} = d(i, j)$. Décrire l'ensemble \mathcal{D} des matrices $D \in \mathcal{M}_N(\mathbb{R})$ qui correspondent à une métrique sur X . Quelles sont les propriétés de cet ensemble ?
(Correction page 155)

Définition I.2.2. (Diamètre (•))

Soit (X, d) un espace métrique, et $A \subset X$ une partie non vide de X . On appelle diamètre de A le nombre (potentiellement égal à $+\infty$)

$$\text{diam}(A) = \sup_{x, y \in A} d(x, y) \in [0, +\infty].$$

Exercice I.2.2. Proposer une métrique sur $X =]-1, 1[$ qui en fasse un espace de diamètre infini.
(Correction page 155)

Définition I.2.3. (Distance à une partie)

Soit (X, d) un espace métrique, $A \subset X$ non vide, et $x \in X$. On définit la distance de x à A par

$$d(x, A) = \inf_{y \in A} d(x, y).$$

2. Il s'agit là d'un domaine extrêmement vaste, qui dépasse largement le cadre de ce cours. Citons simplement les trois grandes méthodes de discrétisation en espace : différences finies, éléments finis (très utilisés par exemple en mécanique du solide), et volumes finis (très adaptés à la discrétisation de lois de conservation dites hyperboliques, utilisés par exemple pour modéliser les écoulements compressibles). Selon des procédures diverses, chacune de ces méthodes est basée sur un espace de dimension finie dont les éléments (fonctions particulières, par exemple affines par morceaux pour certaines méthodes d'éléments finis), ont vocation à *approcher* les solutions des systèmes de départ.

On dit que cette distance est *atteinte* s'il existe $z \in A$ tel que $d(x, A) = d(x, z)$.

Exercice I.2.3. On se place sur $X = \mathbb{R}^2$ muni de la distance usuelle. Donner un exemple de partie $A \subset X$ pour laquelle la distance à A est atteinte pour n'importe quel point $x \in \mathbb{R}$, et un exemple de partie pour laquelle cette distance n'est atteinte que pour les points de A . (Correction page 156)

Exercice I.2.4. On se place sur un espace métrique X . Montrer que la fonction

$$x \in A \longmapsto d(x, A)$$

ne caractérise pas A en général, en donnant un exemple de $A \subset X$ pour lequel il existe d'autres ensembles conduisant à la même fonction distance. Montrer en particulier que cette fonction peut être identiquement nulle sans que A ne s'identifie à X . (Correction page 156)

Définition I.2.4. (Boules ouvertes, boules fermée, sphères (•))

Soit (X, d) un espace métrique, on appelle boule ouverte de centre x et de rayon $r \geq 0$ l'ensemble

$$B(x, r) = \{y \in X, d(x, y) < r\}.$$

La boule fermée, notée $\overline{B}(x, r)$, est obtenue en remplaçant l'inégalité stricte par l'inégalité large $d(x, y) \leq r$. La sphère de centre x et de rayon r est l'ensemble des points situés à distance r de x :

$$S(x, r) = \{y \in X, d(x, y) = r\}.$$

Définition I.2.5. (Ensemble discret)

Soit (X, d) un espace métrique, et A une partie de X . On dit que l'ensemble A est *discret* si pour tout point de A il existe une boule de centre x qui ne contient pas d'autre élément de A , c'est-à-dire :

$$\forall x \in A, \exists \varepsilon > 0, B(x, \varepsilon) \cap A = \{x\}.$$

Remarque I.2.6. On prendra garde au fait que, dans la définition ci-dessus, le ε dépend x , de telle sorte que l'ensemble $\{1/n, n \in \mathbb{N}\} \subset \mathbb{R}$ est discret.

Espaces métriques particuliers : les espaces vectoriels normés

Lorsque l'ensemble considéré a une structure d'espace vectoriel, il est en général fécond de choisir des distances particulières qui respectent la structure linéaire sous-jacente. On souhaite en particulier que la distance entre deux points x et y ne dépende que du vecteur $y - x$. Ces distances particulières sont construites à partir de *normes*, selon $d(u, v) = \|v - u\|$, où $\|\cdot\|$ est une norme selon la définition qui suit.

Définition I.2.7. (Norme, espace vectoriel normé (•))

Soit E un espace vectoriel. On appelle norme une application de E dans \mathbb{R}_+ , notée $u \longmapsto \|u\|$ qui vérifie les propriétés suivantes :

- (i) (*Séparation*) Pour tout u dans E , on a $\|u\| = 0 \iff u = 0$.
- (ii) (*Homogénéité*) Pour tout $u \in E$, tout $\lambda \in \mathbb{R}$, $\|\lambda u\| = |\lambda| \|u\|$.
- (iii) (*Inégalité triangulaire*) Pour tous u, v dans E , on a

$$\|u + v\| \leq \|u\| + \|v\|$$

Le couple $(E, \|\cdot\|)$ est appelé *espace vectoriel normé*. On vérifie immédiatement que c'est un espace métrique pour

$$(u, v) \longmapsto d(u, v) = \|v - u\|.$$

Exercice I.2.5. (•) Soit E un e.v.n. Montrer que, pour tous x, y dans E , on a

$$|\|x\| - \|y\|| \leq \|x - y\|.$$

(Correction page 156)

Proposition I.2.8. (Normes $\|\cdot\|_p$ sur \mathbb{R}^d (•))

L'ensemble des réels muni de la valeur absolue est un e.v.n. Pour tout d entier ≥ 1 , tout $p \in [1, +\infty]$, les expressions

$$\|x\|_p = \left(\sum_{k=1}^d |x_k|^p \right)^{1/p} \quad \text{si } p \in [1, +\infty[, \quad \|x\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq d} |x_i|,$$

définissent des normes sur \mathbb{R}^d , qu'on appelle norme p , ou norme ℓ^p . Le cas $p = 2$ correspond à la norme dite *euclidienne*, associée au produit scalaire canonique

$$\langle x | y \rangle = \sum_{i=1}^d x_i y_i,$$

de telle sorte que $\|x\|_2 = \langle x | x \rangle^{1/2}$.

Démonstration. On sait déjà que $|x - y|$ définit une distance sur \mathbb{R} (proposition IV.1.25), on a donc la séparation et l'inégalité triangulaire. Et on a par ailleurs $|\lambda x| = |\lambda| |x|$ pour tous x et λ réels par définition de la valeur absolue et du produit entre réels.

En dimension supérieure, les propriétés de séparation et d'homogénéité sont immédiates. L'inégalité triangulaire pour $p = +\infty$ découle de celle de la valeur absolue :

$$\|x + y\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq d} |x_i + y_i| \leq \max_{1 \leq i \leq d} (|x_i| + |y_i|) \leq \max_{1 \leq i \leq d} |x_i| + \max_{1 \leq i \leq d} |y_i|.$$

Pour $p \in [1, +\infty[$ est une conséquence directe de l'inégalité dite de *Minkovski* (voir proposition IV.1.25, page 132). \square

A toute norme on peut associer une application de $E \times E$ dans \mathbb{R}^+ , qui à (u, v) associe $d(u, v) = \|v - u\|$. C'est un cas particulier de la notion générale de *distance*, qui peut se définir sur des espaces qui n'ont pas de structure vectorielle

Exercice I.2.6. (•) Donner l'allure de la sphère unité (sphère de centre l'origine et de rayon 1) de \mathbb{R}^2 pour les différentes normes p (on distinguera les cas $p = 1$, $p \in]1, 2[$, $p = 2$, $p \in]2, +\infty[$, et $p = +\infty$). (Correction page 156)

I.3 Topologie des espaces métriques, vocabulaire de base

Notions principales : ouvert, fermé, adhérence, intérieur, frontière, voisinage, partie dense.

Définition I.3.1. (Ouverts et fermés d'un espace métrique (•))

Soit (X, d) un espace métrique. On dit que $U \subset X$ est ouvert s'il est vide³ ou si tout x dans U est centre d'une boule ouverte non vide incluse dans U , i.e.

$$\forall x \in U, \exists r > 0, B(x, r) \subset U.$$

On dit qu'une partie de X est fermée si son complémentaire est ouvert.

3. Cette précision n'est pas à strictement parler nécessaire, car l'ensemble vide vérifie automatiquement toute condition du type : "Pour tout x dans \emptyset, \dots ".

Exercice I.3.1. Préciser dans les cas suivants si $A \subset X$ vu comme partie de l'espace métrique X (muni dans les exemples de la distance euclidienne canonique) est un ouvert, un fermé, ou ni l'un ni l'autre.

$$A_1 = \{0\} \subset \mathbb{R}, \quad A_2 = [0, 1] \subset \mathbb{R}, \quad A_3 = [0, 1[\subset \mathbb{R}, \quad A_4 = [0, +\infty[\subset \mathbb{R}, \quad A_5 = \mathbb{Q} \subset \mathbb{R},$$

$$A_6 = \bigcup_{n=1}^{+\infty}]n, n + 1/n[\subset \mathbb{R}, \quad A_7 = \bigcup_{n=1}^{+\infty} [n, n + 1/n] \subset \mathbb{R},$$

$$A_8 =]0, 1[\times]0, 1[\subset \mathbb{R}^2, \quad A_9 =]0, 1[\times]0, 1[\times \{0\} \subset \mathbb{R}^3, \quad A_{10} = \mathbb{N} \times \mathbb{R} \subset \mathbb{R}^2.$$

(Correction page 156)

Proposition I.3.2. (•) Soit (X, d) un espace métrique.

L'ensemble vide et X sont à la fois fermés et ouverts.

Toute union d'ouverts est un ouvert, et toute intersection finie d'ouverts est un ouvert.

Toute intersection de fermés est fermée, et toute union finie de fermés est fermée.

Démonstration. L'ensemble vide est un ouvert par définition, et X est lui-même ouvert car toutes les boules sont dans X .

Soit $(U_i)_{i \in I}$ une famille d'ouverts, et U leur union. Tout $x \in U$ est dans l'un des U_i , il existe donc une boule $B(x, r) \subset U_i \subset \bigcup U_j$.

Soient maintenant U_1, U_2, \dots, U_N des ouverts de X . Pour x dans l'intersection, pour tout i il existe $r_i > 0$ tel que $B(x, r_i) \subset U_i$. Si l'on prend $r = \min(r_i)$ (qui est bien strictement positif car la famille est finie), alors $B(x, r)$ est dans l'intersection des U_i .

Les propriétés sur les fermés se déduisent des propriétés sur les ouverts par complémentarité. Par exemple, pour toute collection (F_i) d'ouverts, si l'on note $U_i = F_i^c$ le complémentaire de F_i (qui est un ouvert par définition), on a

$$\bigcap_{i \in I} F_i = \bigcap_{i \in I} U_i^c = \left(\bigcup_{i \in I} U_i \right)^c.$$

Une union finie de fermés se ramène de la même manière à une intersection finie d'ouverts. □

Exercice I.3.2. On se place sur \mathbb{R} muni de la distance usuelle. Montrer qu'une intersection infinie d'ouverts peut ne pas être ouverte, et qu'une union infinie de fermés peut ne pas être fermée. (Correction page 156)

Remarque I.3.3. (Vers la topologie générale)

Les propriétés de la proposition précédente permettent de définir ce que l'on appelle une topologie (voir section IV.2.3, page 134), dans un cadre général (sans recourir à la notion de métrique). Elles sont utilisées comme définition d'une famille d'ouverts, qui définit une topologie générale sur un ensemble. Dans le présent contexte des espaces métriques, la proposition précédente permet donc de s'assurer que la définition I.3.1 correspond bien à une topologie au sens général.

Remarque I.3.4. (Très importante, et un peu délicate)

Il est important de garder à l'esprit que, pour une métrique donnée, les caractéristiques topologiques d'un ensemble ne sont pas intrinsèques, mais dépendent de l'espace topologique dans lequel il est inclus. Ainsi on dira que l'intervalle $I = [0, 1]$ n'est pas ouvert, en considérant implicitement qu'il est considéré comme sous-ensemble de \mathbb{R} muni de la topologie usuelle. Toute boule centrée en 1 contient des réels strictement supérieurs à 1, ce qui exclut que I soit ouvert. Si l'on considère en revanche que l'univers se réduit à I lui-même, considéré comme un espace à part entière (que l'on pourrait donc

noter X dans l'esprit de ce qui précède), alors $I = X = [0, 1]$ est bien un ouvert, puisque les réels strictement supérieurs à 1 considérés ci-dessus ne sont pas dans le paysage. Noter qu'il est aussi fermé, conformément à la première assertion de la proposition I.3.2.

Du fait qu'une union d'ouverts est un ouvert, et qu'une intersection de fermés est fermée, on peut définir les notions de plus grand ouvert contenu dans un ensemble (intérieur), et de plus petit fermé qui contienne un ensemble (adhérence).

Définition I.3.5. (Intérieur, adhérence, frontière (•))

Soit (X, d) un espace métrique, et A une partie de X .

On appelle *adhérence* de A , et l'on note \bar{A} , le plus petit fermé contenant A , i.e. l'intersection de tous les fermés qui contiennent A .

On appelle *intérieur* de A , et l'on note \mathring{A} , le plus grand ouvert contenu dans A , i.e. l'union de tous les ouverts que A contient.

On appelle *frontière* de A l'ensemble $\partial A = \bar{A} \setminus \mathring{A} = \bar{A} \cap \mathring{A}^c$.

On appelle *voisinage* d'un point x toute partie de X qui contient un ouvert contenant x .

On appelle *base de voisinages* de x un ensemble $\mathcal{B}(x)$ de voisinages de X telle que, pour tout voisinage V de x , il existe un élément de $\mathcal{B}(x)$ inclus dans V .

Exercice I.3.3. (•) a) Montrer qu'un ouvert est un ensemble qui s'identifie à son intérieur, et qu'un fermé est un ensemble qui s'identifie à son adhérence.

b) Comment caractériser un ensemble qui s'identifie à sa frontière? (Correction page 157)

Exercice I.3.4. (•) On se place dans \mathbb{R}^2 muni de la distance euclidienne. Préciser \bar{A} , \mathring{A} et ∂A dans les cas suivants :

$$\begin{aligned} a) A = \{x_1, \dots, x_N\} \quad b) A = B(0, 1) \quad c) A = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2, y \geq 0\} \\ d) A = \{(1/n, 0), n = 1, 2, \dots\} \quad e) A = \{(t, \sin(1/t)), t \in]0, +\infty[\}. \end{aligned}$$

(Correction page 157)

Remarque I.3.6. L'appellation la plus conforme à l'intuition commune est celle de frontière. Si l'on considère par exemple la zone occupée par un pays, la frontière topologique correspond bien à la frontière administrative, constituée de lignes marquant la séparation avec un pays voisin, à laquelle se rajoutent les bords naturels du pays (côtes). Dans ce cadre, conformément à l'intuition, la frontière est *petite* par rapport à l'objet lui-même, on serait tenté de dire qu'elle ne "pèse rien"⁴. On prendra cependant garde au fait que, si l'on sort du cadre de domaines réguliers comme des pays sur une carte, certains ensembles ont une frontière beaucoup plus "grosse" qu'eux-mêmes. On se reportera par exemple à l'exercice I.3.5, qui établit que l'ensemble des rationnels, qui est négligeable, admet pour frontière l'ensemble des réels⁵.

Le terme *ouvert* évoque le fait qu'un objet ne contienne aucun point de sa frontière, il est en quelque sorte directement exposé au monde extérieur, par opposition à un fermé qui contient sa frontière, et se trouve en quelque sorte *délimité*.

4. Mathématiquement (voir chapitre sur la théorie de la mesure et de l'intégration), on pourra établir qu'un domaine régulier est de mesure strictement positive, alors que sa frontière est de mesure nulle. Pour revenir au contexte géographique, ces considérations expriment de façon abstraite le fait que, si l'on prend au hasard un point en Europe, il y a peu de chance qu'il se trouve sur la frontière entre deux pays : on dira qu'il s'agit *presque sûrement* d'un point intérieur à l'un des pays.

5. Un pays construit de la sorte risquerait de consacrer l'essentiel de son budget à entretenir ses douaniers et ses gardes-côtes.

Remarque I.3.7. Il peut sembler étonnant que ces notions puissent être pertinentes dans une démarche de modélisation du réel, puisque ce qui distingue par exemple un ouvert de son adhérence consiste en des points qui sont infiniment proches (en deçà de toute longueur mesurable en pratique) de l'objet lui-même. Elles sont pourtant d'une importance considérable. On pourra penser par exemple à la modélisation d'un matériau déformable qui occupe une certaine zone de l'espace physique. On choisira de représenter cette zone par un ouvert⁶, souvent noté Ω (on parle de *domaine*). Ainsi, chaque point x de Ω est entouré d'une petite zone située à l'intérieur de l'objet modélisé, ce qui permet d'écrire l'équilibre des forces en x à partir des propriétés constitutives du matériau. On obtient ainsi une équation aux dérivées partielles qui a du sens en tout point de (l'ouvert) Ω . La frontière correspond à l'interface avec le monde extérieur (l'air libre, ou un autre matériau). Sur cette frontière l'équation constitutive du matériau n'est pas valide, mais on prescrira l'équilibre de l'interface qui impliquera les lois constitutives de part et d'autre, et on parlera de *condition aux limites* si l'extérieur est un milieu simple (comme du vide), ou de *conditions d'interface* s'il s'agit d'une zone de contact entre deux matériaux.

Remarque I.3.8. Dans l'esprit de la remarque précédente, on ne s'autorise à parler de la dérivée en un point x d'une fonction définie sur un sous-ensemble A de \mathbb{R} que lorsque x appartient à l'intérieur de cet ensemble. Pour que la dérivée puisse être définie en tout point de A , il est nécessaire que A soit ouvert. De la même manière, comme précisé dans le chapitre II, on ne pourra définir la différentielle d'une fonction définie sur $A \subset \mathbb{R}^d$ qu'en un point x *intérieur* à A . Il est en effet essentiel dans la définition de la dérivée ou de la différentielle que l'on puisse effectuer des petites variations autour du point considéré en restant dans l'ensemble sur lequel la fonction est définie.

Exercice I.3.5. (•) Montrer que \mathbb{Q} , comme partie de l'espace métrique \mathbb{R} (muni de sa distance usuelle), est d'intérieur vide, d'adhérence et de frontière \mathbb{R} . En quel(s) sens peut-on dire que la frontière de cet ensemble est "beaucoup plus grosse" que l'ensemble lui-même? (Correction page 157)

Définition I.3.9. (Densité (•))

Soit (X, d) un espace métrique, et A une partie de X . On dit que A est *dense* dans X si $\overline{A} = X$.

Nous terminons cette section par quelques propriétés de \mathbb{R} , et de sa version *achevée* $\overline{\mathbb{R}} = \mathbb{R} \cup \{+\infty\} \cup \{-\infty\} = [-\infty, +\infty]$.

Proposition I.3.10. L'ensemble $\mathbb{D} \subset \mathbb{R}$ des nombres décimaux et l'ensemble \mathbb{Q} des nombres rationnels sont denses dans \mathbb{R} .

Proposition I.3.11. Les ouverts de \mathbb{R} sont les réunions dénombrables d'intervalles ouverts.

Démonstration. Soit $U \subset \mathbb{R}$ un ouvert. Pour $x \in U$, on introduit

$$b_x = \sup \{y \geq x, [x, y] \subset U\}$$

Comme U est ouvert, il contient un intervalle du type $[x - \varepsilon, x + \varepsilon]$, avec $\varepsilon > 0$, on a donc $b_x \geq x + \varepsilon > x$. Si b_x est fini, b_x ne peut pas être dans U , sinon $[x, b + \varepsilon]$ serait dans U pour ε assez petit, et b_x serait battu. L'intervalle $[x, b_x[$ est donc dans U , et b_x ne l'est pas (qu'il soit infini ou fini). De la même manière on construit un intervalle $]a_x, x]$ dans U , avec $a_x \notin U$. L'intervalle $I_x =]a_x, b_x[$ est donc dans U , qui s'écrit ainsi comme réunion de ces intervalles⁷.

Par densité de \mathbb{Q} dans \mathbb{R} , chacun de ces intervalles contient un rationnel. On peut donc construire une injection de cette famille d'intervalle dans \mathbb{Q} , la famille est donc dénombrable. \square

6. Ce choix est d'une certaine manière arbitraire, ou simplement justifié par ce qui suit. La question de savoir s'il est licite ou pas de considérer qu'un objet physique contienne sa frontière ou pas dépend du contexte de la modélisation.

7. Ces intervalles sont les classes d'équivalence de la relation \mathcal{R} d'équivalence (voir définition IV.1.4, page 123, définie par $x \mathcal{R} y$ si $[x, y] \subset U$ (ou $[y, x] \subset U$ si $y < x$).

La droite réelle achevée (••)

Dans certains contextes, en particulier en théorie de l'intégration, il est pertinent de compléter \mathbb{R} par des valeurs "aux bouts" :

Définition I.3.12. (Droite réelle achevée)

On appelle *droite réelle achevée*, et l'on note $\overline{\mathbb{R}}$, l'ensemble $\mathbb{R} \cup \{-\infty\} \cup \{+\infty\}$, muni de la relation d'ordre canonique sur \mathbb{R} complétée par

$$-\infty < a < +\infty$$

pour tout $a \in \mathbb{R}$.

Proposition I.3.13. On peut munir $\overline{\mathbb{R}}$ d'une métrique

$$d(x, y) = |\arctan(y) - \arctan(x)|,$$

avec la convention $\arctan(\pm\infty) = \pm\pi/2$. Cette métrique induit une topologie sur $\overline{\mathbb{R}}$ telle que tout ouvert est soit un ouvert de \mathbb{R} soit du type $U \cup]a, +\infty]$, $U \cup [-\infty, b[$, ou $U \cup]a, +\infty] \cup [-\infty, b[$.

Démonstration. Le fait que $d(\cdot, \cdot)$ soit une distance se vérifie sans difficulté. On reprend maintenant l'argument utilisé dans la démonstration de la proposition I.3.11. Cette approche permet de décomposer tout ouvert U en une réunion dénombrables d'intervalles ouverts⁸, la seule différence ici étant que l'un de ces intervalles peut être du type $]a, +\infty]$ ou $[-\infty, b[$. Cette décomposition assure la propriété annoncée.

Soit maintenant U un ouvert de $\overline{\mathbb{R}}$. Si U ne contient ni $+\infty$ ni $-\infty$, alors c'est aussi un ouvert de \mathbb{R} . S'il contient par exemple $+\infty$, alors il contient une boule $B(+\infty, \eta)$, avec $\eta > 0$. \square

Exercice I.3.6. (•) Quel est le diamètre de $\overline{\mathbb{R}}$ muni de la métrique définie ci-dessus ? Quelle est la boule ouverte de centre 0 et de rayon $\pi/2$? La boule ouverte de centre 1 et de rayon $\pi/2$? (Correction page 157)

Exercice I.3.7. (•) Donner un autre exemple de métrique sur $\overline{\mathbb{R}}$ conduisant à la même topologie. (Correction page 157)

I.4 Suites

Définition I.4.1. (Suite (•))

Une suite dans un ensemble X est une collection de points de X (non nécessairement distincts) indexée par les entiers. Plus formellement, on peut voir une suite comme une application de \mathbb{N} dans X . On note dans ce contexte x_n l'image de n par cette application.

Définition I.4.2. (Suite convergente (•))

Soit (X, d) un espace métrique. On dit que la suite $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ converge vers ℓ si la distance de x_n à ℓ peut être rendue arbitrairement petite pour n assez grand :

$$\forall \varepsilon, \exists N, \forall n \geq N, d(x_n, \ell) < \varepsilon.$$

Proposition I.4.3. (Unicité de la limite (•))

Une suite convergente ne peut converger que vers une seule limite.

8. On appelle ces ouverts les *composantes connexes* de U .

Démonstration. Soient ℓ et ℓ' deux limites de la suite (x_n) . Pour tout ε , il existe N et N' tels que, pour tout $n \geq \max(N, N')$, $d(x_n, \ell) < \varepsilon$ et $d(x_n, \ell') < \varepsilon$. On a donc, en prenant $n = \max(N, N')$,

$$0 \leq d(\ell, \ell') \leq d(\ell, x_n) + d(x_n, \ell') < 2\varepsilon.$$

On a donc $d(\ell, \ell') = 0$, d'où $\ell = \ell'$. □

Définition I.4.4. (Valeur d'adhérence (●))

Soit (X, d) un espace métrique et $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite de points de X . On dit que x est valeur d'adhérence pour la suite s'il existe une suite extraite qui converge vers x , i.e. s'il existe une application φ strictement croissante de \mathbb{N} dans \mathbb{N} telle que la suite $(x_{\varphi(n)})$ converge vers x .

Proposition I.4.5. (●●) Soit $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite de points de l'espace métrique X . Le point x est valeur d'adhérence pour la suite si et seulement si, pour tout $\varepsilon > 0$, l'ensemble

$$\{n \in \mathbb{N}, x_n \in B(x, \varepsilon)\}$$

est infini.

Démonstration. Si x est valeur d'adhérence, on peut extraire une sous-suite $(x_{\varphi(n)})$ qui converge vers x . L'ensemble

$$\{n \in \mathbb{N}, x_{\varphi(n)} \in B(x, \varepsilon)\}$$

est infini par définition de la convergence d'une suite.

Réciproquement, on prend $\varepsilon = 1$. Comme l'ensemble $\{n \in \mathbb{N}, x_n \in B(x, 1)\}$ est infini, il est non vide, et on peut considérer k_1 son plus petit élément. On continue ensuite avec $\varepsilon = 1/2$, auquel on associe k_2 le plus petit élément de $\{n \in \mathbb{N}, x_n \in B(x, 1/2)\}$ strictement supérieur à k_1 . On construit ainsi une suite extraite (x_{k_n}) telle que $d(x_{k_n}, x) < 1/2^n$, donc qui converge vers x . □

Proposition I.4.6. (Caractérisations séquentielles)

Soit (X, d) un espace métrique, et A une partie de X . On a les équivalences :

1. Un point $x \in X$ est dans l'adhérence de A si et seulement si x est limite d'une suite de points (non nécessairement distincts, il peut s'agir de la suite constante égale à x) de A .
2. Un point $x \in A$ est dans l'intérieur de A si et seulement si toute suite convergeant vers x est dans A au delà d'un certain rang.
3. A est fermé si et seulement si, pour toute suite de points de A qui converge dans X , la limite est dans A .

Démonstration. 1. Soit x dans l'adhérence de A . Si x est dans A , il est limite de la suite constante égale à x . Si $x \notin A$, pour tout $n \in \mathbb{N}$, la boule $B(x, 1/n)$ rencontre nécessairement A en un point x_n . Si tel n'était pas le cas, alors $\bar{A} \setminus B(x, 1/n) = \bar{A} \cap B(x, 1/n)^c$ serait un fermé qui contient A , strictement plus petit que \bar{A} , ce qui est absurde. La suite (x_n) de points de A ainsi construite converge vers x par construction. Soit maintenant $x \notin \bar{A}$, il est dans son complémentaire, qui est un ouvert d'intersection vide avec A , il existe donc une boule ouverte $B(x, \varepsilon)$ qui ne contient aucun élément de A . Le point x ne peut donc être limite d'une suite de points de A .

2. Soit (x_n) une suite qui converge vers $x \in \overset{\circ}{A}$. Il existe $r > 0$ tel que $B(x, r) \subset A$. Par convergence de la suite, il existe N tel que, pour tout $n \geq N$, on a $d(x, x_n) < r$. On a donc $x_n \in B(x, r) \subset A$ pour tout $n \geq N$.

Réciproquement, si $x \in A$ n'est pas dans l'intérieur de A , pour tout $n > 0$, $B(x, 1/n)$ n'est pas incluse dans A , il existe donc $x_n \in B(x, 1/n) \cap A^c$. Cette suite converge vers x , mais ne rencontre pas A .

3. Soit $A \subset X$ fermé. Tout point de A^c , qui est ouvert, est dans une boule de rayon ε qui ne contient aucun élément de A , il ne peut donc être limite d'une suite de points de A . Réciproquement, si A n'est pas fermé, A^c n'est pas ouvert, il contient donc un élément x tel que pour tout ε , $B(x, \varepsilon)$ contient un élément qui n'est pas dans A^c , i.e. qui est dans A . On peut donc ainsi construire une suite de points de A qui converge vers $x \notin A$.

□

I.5 Complétude

La notion de complétude abordée dans cette section joue un rôle essentiel en analyse, pour montrer en particulier des résultats d'existence à toutes sortes de problèmes. Dans des espaces dits *complets*, au sens précisé ci-dessous, on dispose d'un critère de convergence d'une suite qui *n'utilise pas la limite elle-même* (contrairement à la définition I.4.2), mais seulement les termes de la suite.

Définition I.5.1. (Suite de Cauchy)

Soit (X, d) un espace métrique. On dit que la suite (x_n) de points de X est de Cauchy si la quantité $d(x_p, x_q)$ peut être rendue arbitrairement petite pour p et q assez grands :

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N, \forall p, q \geq N, d(x_p, x_q) < \varepsilon.$$

Proposition I.5.2. Toute suite convergente est de Cauchy.

Démonstration. Si une suite (x_n) converge vers une limite x , $d(x_n, x)$ peut être rendu arbitrairement petit pour n assez grand. Il en est donc de même pour

$$d(x_p, x_q) \leq d(x_p, x) + d(x, x_q),$$

d'où le caractère de Cauchy de la suite.

□

Exercice I.5.1. (●) Soit X un espace métrique, et (x_n) une suite de Cauchy qui ne prend qu'un nombre fini de valeurs. Montrer que la suite est nécessairement constante au delà d'un certain rang. (Correction page 157)

Exercice I.5.2. (●) Soit X un espace métrique, et (x_n) une suite de Cauchy. On note X_N l'ensemble des termes de la suite au delà du rang N :

$$X_N = \{x_n, n \geq N\}.$$

Montrer que la suite (x_n) est de Cauchy si et seulement si le diamètre de X_N tend vers 0 quand N tend vers $+\infty$.

Définition I.5.3. (Espace métrique complet (●))

On dit que (X, d) est complet si toute suite de Cauchy dans X converge vers un élément de X .

Proposition I.5.4. (●) Soit (X, d) un espace métrique complet. Une partie A de X est complète si et seulement si elle est fermée.

Démonstration. Si $A \subset X$ n'est pas fermée, il existe d'après la proposition I.4.6, page 14, une suite (x_n) de points de A qui converge vers $x \notin A$. Cette suite est de Cauchy (proposition I.5.2 ci-dessus), non convergente dans A , qui ne saurait donc être complet.

Si maintenant $A \subset X$ est fermée, toute suite de Cauchy dans A et de Cauchy dans X , elle converge donc vers $x \in X$. Cette limite est dans A , toujours d'après la proposition I.4.6.

□

Proposition I.5.5. (••) Soit $d \geq 1$ un entier. Pour tout $p \in [1, +\infty]$, l'espace \mathbb{R}^d muni de la norme $\|\cdot\|_p$ (voir proposition I.2.8 page 9), est complet.

Démonstration. La voie à suivre pour montrer la complétude de \mathbb{R} dépend de la manière dont on a construit l'ensemble des réels. On se reportera à la proposition IV.1.26 pour une démonstration dans le cadre d'une construction basée sur l'écriture décimale (section IV.1.4). Si l'on considère maintenant une suite de Cauchy $(x^n) = (x_k^n)_{1 \leq k \leq d}$ dans \mathbb{R}^d , la suite associée à l'une quelconque des composantes est aussi de Cauchy dans \mathbb{R} , donc converge vers une valeur x_k^∞ . On en déduit la convergence de (x^n) vers $(x^\infty) = (x_k^\infty)_{1 \leq k \leq d}$. \square

Exercice I.5.3. (•) Montrer que l'ensemble \mathbb{D} des nombres décimaux, muni de la distance canonique $d(x, y) = |y - x|$, n'est pas complet. (Correction page 158)

Exercice I.5.4. (•)

a) Donner un exemple de suite réelle telle que $|x_{n+1} - x_n|$ tend vers 0, mais qui ne converge pas dans \mathbb{R} .

b) Proposer une procédure pour construire une telle suite, qui soit telle que l'ensemble de ses termes soit de plus *dense* dans \mathbb{R} . (Correction page 158)

I.6 Compacité

La notion de compacité est essentielle en analyse, elle est en particulier à l'origine de l'essentiel des résultats d'existence de solution à des équations issues de la physique. Nous avons privilégié la définition la plus générale, qui pourrait s'appliquer à des espaces non métriques, car elle est basée sur la notion de recouvrement par des ouverts, notion très féconde également au cœur de la définition de la mesure extérieure de Lebesgue qui sera introduite dans la partie sur la théorie de la mesure. Dans le cas d'un espace métrique, la compacité peut se caractériser à l'aide de suites : un ensemble est compact si, de toute suite, on peut en extraire une sous-suite qui converge dans l'ensemble. Le lecteur désireux d'aller au plus simple pourra considérer que cette caractérisation est la définition première, en gardant à l'esprit qu'il en existe une formulation équivalente (et plus générale, puisqu'elle s'applique à des espaces topologique non métriques) basée sur le recouvrement par des ouverts. L'équivalence entre les deux formulations fait l'objet du théorème I.6.2 ci-après, dit de Bolzano-Weierstrass, dont on pourra admettre le résultat.

Définition I.6.1. (Espace métrique compact (•))

Soit (X, d) un espace métrique, et K une partie de X (qui peut être X lui-même). On dit que K est *compact* s'il vérifie la propriété de *Borel-Lebesgue* : de tout recouvrement de K par des ouverts on peut extraire un recouvrement fini :

$$K \subset \bigcup_{i \in I} U_i, \quad U_i \text{ ouvert } \forall i \in I \implies \exists J \subset I, \quad J \text{ fini, tel que } K \subset \bigcup_{i \in J} U_i.$$

Exercice I.6.1. (Compacts de \mathbb{R} (•))

a) Montrer que ni \mathbb{R} (muni de sa métrique usuelle $d(x, y) = |y - x|$) ni $]0, 1[\subset \mathbb{R}$ ne sont compacts.

b) Montrer que tout ensemble fini d'un espace métrique est compact.

c) Montrer que l'ensemble des termes d'une suite strictement réelle décroissante vers 0 n'est pas compact. Montrer que si l'on rajoute à cet ensemble la limite 0, alors l'ensemble est compact.

Exercice I.6.2. Montrer que la droite réelle achevée $\overline{\mathbb{R}} = [-\infty, +\infty]$ muni de la métrique définie par la proposition I.3.13, page 13, est *compacte*.

Dans le cas des espaces métriques, on peut caractériser la compacité de façon séquentielle.

Théorème I.6.2. (Bolzano – Weierstrass (••))

Soit (X, d) un espace métrique, et $K \subset X$. L'ensemble K est compact (définition I.6.1) si et seulement si de toute suite de points de K on peut extraire une sous-suite qui converge vers un élément de K .

Démonstration. (•••) On suppose K compact au sens de la définition I.6.1. On considère une suite (x_n) d'éléments de K . Si cette suite n'admet aucune valeur d'adhérence, c'est-à-dire que l'on ne peut en extraire aucune sous-suite convergente, alors (d'après la proposition I.4.5) pour tout $y \in K$ il existe $r_y > 0$ tel que $B(y, r_y)$ ne contienne qu'un nombre fini de termes de la suite, plus précisément un nombre fini d'indices n tels que x_n est dans cette boule. La réunion de ces boules ouvertes recouvre K par construction, on peut donc en extraire un recouvrement fini :

$$K \subset \bigcup_{i \in J} B(y_i, r_i), \quad J \text{ fini.}$$

Le nombre total d'indices concernés est donc fini, car inférieur à la somme (finie) des cardinaux des indices affectés à chaque boule, ce qui est absurde.

Réciproquement, on suppose maintenant K séquentiellement compact, et l'on considère un recouvrement de K par des ouverts

$$K \subset \bigcup_{i \in I} U_i.$$

La démonstration se fait en trois étapes.

1) On montre dans un premier temps l'existence d'un $\rho > 0$ tel que, pour tout $x \in K$, il existe $i \in I$ tel que $B(x, \rho) \subset U_i$. Si tel n'est pas le cas, pour tout n , il existe $x_n \in K$ tel que $B(x_n, 1/n)$ n'est dans aucun des U_i . On peut extraire une sous-suite $(x_{\varphi(n)})$ qui converge vers $x \in K$ par compacité séquentielle de K . La limite x est dans un ouvert U_{i_0} . Il existe ε tel que $B(x, \varepsilon) \subset U_{i_0}$. Par convergence de $x_{\varphi(n)}$ vers x , il existe N tel que, pour tout $n \geq N$, $d(x_{\varphi(n)}, x) < \varepsilon/2$. On choisit maintenant n tel que $1/\varphi(n) < \varepsilon/2$. La boule $B(x_{\varphi(n)}, \varepsilon/2)$ est alors incluse dans U_{i_0} , ce qui contredit l'hypothèse initiale.

2) Montrons maintenant que K peut être recouvert par une collection finie de boules de rayon ρ . On raisonne une nouvelle fois par l'absurde. Si la propriété n'est pas vraie, on prend $x_1 \in X$ arbitraire. Comme $B(x_1, \rho)$ ne recouvre pas K , il existe $x_2 \in K \setminus B(x_1, \rho)$. Comme $B(x_1, \rho) \cup B(x_2, \rho)$ ne recouvre toujours pas K , il existe $x_3 \in K \setminus (B(x_1, \rho) \cup B(x_2, \rho))$. On construit ainsi par récurrence une suite (x_n) telle que tous les termes sont distants deux à deux d'au moins $\rho > 0$, on ne peut donc pas en extraire une sous-suite convergente, ce qui contredit la compacité séquentielle.

3) D'après le 2, il existe une collection finie de points x_1, \dots, x_N telles que

$$K \subset \bigcup_{n=1}^N B(x_n, \rho).$$

Comme chacune de ces boules $B(x_n, \rho)$ est dans l'un des ouverts U_{i_n} , on a bien un sous-recouvrement fini de K par les ouverts U_{i_n} , $n = 1, \dots, N$. \square

Proposition I.6.3. Tout compact K d'un espace métrique X est fermé.

Démonstration. On utilise la caractérisation séquentielle du caractère fermé (proposition I.4.6) : si K est fermé, pour toute suite d'éléments de K qui converge dans X , la limite est dans K . On considère donc une telle suite. Si K est compact, on peut en extraire une sous-suite qui converge dans K , et la limite de la suite de départ s'identifie à la limite de cette suite extraite. La limite est donc dans K , d'où le caractère fermé de K . \square

Exercice I.6.3. Montrer que l'intersection de deux compacts est compacte.

Exercice I.6.4. Montrer que tout fermé inclus dans un compact d'un espace métrique est compact.

Théorème I.6.4. (Heine – Borel ou Borel – Lebesgue)

Les compacts de \mathbb{R}^d (pour toute norme $\|\cdot\|_p$, avec $1 \leq p \leq +\infty$) sont les fermés bornés.

Démonstration. Soit K un compact de \mathbb{R}^d . Si K n'est pas borné, on peut construire une suite d'éléments de K dont la norme tend vers $+\infty$. Il est de façon évidente impossible d'extraire d'une telle suite une sous-suite convergente, K est donc nécessairement borné. La proposition I.6.3 ci-dessus assure par ailleurs que K est fermé.

Réciproquement, il s'agit de montrer que tout fermé borné de \mathbb{R}^d est compact. On considère d'abord le cas $d = 1$. Soit K un fermé borné de \mathbb{R} , et (x_n) une suite d'éléments de K . On suppose pour simplifier les notations que K est inclus dans l'intervalle $[0, 1]$. Au moins l'un des deux intervalles $[0, 1/2]$ et $]1/2, 1]$ contient une infinité de termes. On considère un tel sous-intervalle, et l'on choisit un terme de la suite, x_{n_1} , qui en fait partie. On subdivise en deux ce sous-intervalle, pour obtenir deux sous-intervalles de longueur $1/4$ dont l'un au moins contient une infinité de termes. On en prend un point x_{n_2} , avec $n_2 > n_1$. On construit ainsi par récurrence une suite extraite (x_{n_k}) , qui vérifie pour $p < q$,

$$|x_{n_q} - x_{n_p}| \leq \frac{1}{2^p},$$

elle est donc de Cauchy, donc converge dans \mathbb{R} (voir proposition IV.1.26). Comme K est fermé, la limite est dans K (voir proposition I.4.6). On a donc pu extraire une sous suite qui converge dans K , ce qui assure sa compacité.

Dans le cas $d > 1$, on peut mettre en œuvre une approche analogue, en décomposant à chaque étape un cube de côté $1/2^k$ en 2^d cubes de côté $1/2^{k+1}$. On peut aussi appliquer ce qui précède à la première coordonnée, en extrayant une sous-suite convergente, puis passer à la seconde coordonnée en extrayant une sous-suite à cette première sous-suite, et continuer jusqu'à la d -ème coordonnée. \square

Remarque I.6.5. Le dictionnaire de l'Académie Française décrit comme compact un “objet dont les constituants sont serrés les uns contre les autres, pour former un substrat condensé”⁹. La définition mathématique dépasse largement cette acception commune, comme le suggère l'exercice I.6.1, en particulier du fait qu'un ensemble fini de points est compact. Pour s'en faire une idée intuitive, il est plus aisé d'identifier les propriétés qui font qu'un ensemble n'est *pas* compact. En premier lieu, comme l'indique la proposition I.6.3, la non compacité peut venir d'un défaut de fermeture : on peut extraire une sous-suite convergente, mais la limite n'est pas dans l'ensemble. Cela peut être corrigé en rajoutant les limites possibles de suites de l'ensemble, en considérant simplement l'adhérence de l'ensemble de départ (un tel ensemble dont l'adhérence est compacte est appelé *relativement compact*). Il y a des causes plus essentielles de non compacité. En premier lieu le caractère non borné de l'ensemble. L'ensemble \mathbb{N} des entiers naturels dans \mathbb{R} est bien fermé, mais de façon évidente non compact, car non borné (on peut recouvrir \mathbb{N} par des boules de rayon suffisamment petit pour que chaque boule ne contienne qu'un entier, il est alors évidemment impossible d'extraire un recouvrement fini). La dernière cause de non-compacité est plus profonde et moins facile à appréhender, elle porte sur le cœur de l'objet lui-même, ou plutôt de la nature de l'espace sous-jacent auquel il appartient. Dans un espace vectoriel normé de *dimension infinie*, on peut vérifier par exemple que la boule unité fermée, qui est bien fermée et bornée, n'est *pas compacte*. Considérons à titre d'exemple l'espace des polynômes¹⁰ muni de la norme définie comme le maximum des valeurs absolues des coefficients. La boule unité fermée de cet espace vectoriel normé de dimension est un fermé borné. Or la suite (X^n) est telle que la distance entre deux termes est égal à 1, on ne peut donc en extraire aucune sous suite convergente.

9. Le terme est souvent utilisé à propos de *foules compactes*.

10. On peut assimiler cet espace à l'espace F des suites finies (a_n) (qui s'annulent au-delà d'un certain rang), muni de la norme ℓ^∞ qui correspond au maximum des valeurs absolues des termes.

Exercice I.6.5. (••) Montrer que l'espace des polynômes muni de la norme ∞ sur les coefficients (évoqué à la fin de la remarque précédentes) n'est *pas complet*.

I.7 Applications entre espaces métriques

Définition I.7.1. (Application continue entre espaces métriques)

Une application f de (X, d) dans (X', d') est dite continue en x si $d'(f(x), f(y))$ peut être rendu arbitrairement petit pour tout y suffisamment proche de x , c'est-à-dire :

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \eta > 0, \forall y \in X, d(x, y) < \eta \implies d'(f(x), f(y)) < \varepsilon.$$

On peut exprimer ce qui précède de façon séquentielle : pour toute suite (x_n) de X qui converge vers x , la suite $(f(x_n))$ des images converge vers $f(x)$.

On dit que f est continue sur X si elle est continue en tout point de X .

Cette définition est équivalente à une autre, plus abstraite, qui présente l'avantage de pouvoir s'appliquer à des espaces topologiques généraux (sans métrique). L'équivalence, dans le cas métrique, entre les deux, fait l'objet de la proposition suivante.

Proposition I.7.2. (Continuité d'une application, caractérisation générale (•••))

Une application f de (X, d) dans (X', d') est continue si et seulement si l'image réciproque par f de tout ouvert de X' est un ouvert de X . De la même manière, une application f de (X, d) dans (X', d') est continue si et seulement si l'image réciproque par f de tout fermé de X' est un fermé de X .

Démonstration. Soit f une application de (X, d) dans (X', d') , continue au sens de la définition I.7.1 ci-dessus. On considère un ouvert U' de X' . Si $f^{-1}(U')$ est vide, il est ouvert. S'il n'est pas vide, pour tout x dans cette image réciproque, $f(x) = x' \in U'$ par définition de l'image réciproque. Comme U' est ouvert, il contient une boule $B(x', \varepsilon)$. Par continuité de f en x , il existe η tel que, pour tout y à distance de x inférieure à η , la distance de $f(y)$ à x' est inférieure à ε , ce qui signifie exactement $f(B(x, \eta)) \subset B(x', \varepsilon) \subset U'$. On a donc $B(x, \eta) \subset f^{-1}(U')$, d'où $f^{-1}(U')$ ouvert.

Montrons la réciproque. Soit f une application telle que l'image réciproque de tout ouvert de l'espace d'arrivée est un ouvert de l'espace de départ. Soit $x \in X$, et $\varepsilon > 0$. L'image réciproque de $B(f(x), \varepsilon)$ est un ouvert, donc son image réciproque est un ouvert contenant x . Il existe donc $\eta > 0$ tel que $B(x, \eta) \subset f^{-1}(B(f(x), \varepsilon))$, c'est-à-dire $f(B(x, \eta)) \subset B(f(x), \varepsilon)$.

Pour la caractérisation par les images réciproques de fermés, on utilise le fait que tout fermé F' de X' s'écrit $F' = U'^c$, où U' est ouvert. On a donc

$$f^{-1}(F') = f^{-1}(U'^c) = (f^{-1}(U'))^c,$$

qui est fermé si et seulement si $f^{-1}(U)$ est ouvert. □

Exercice I.7.1. Montrer que l'image (directe) d'un ouvert par une application continue peut ne pas être ouverte, de même que l'image d'un fermé peut ne pas être fermée.

Proposition I.7.3. (Image d'un compact par une application continue (•))

Soit f une application de (X, d) dans (X', d') . Si f est continue, alors l'image d'un compact de X est compacte dans X' .

Démonstration. Soit K un compact de X . Une suite de $f(K)$ s'écrit $(f(x_n))$, avec $x_n \in K$ pour tout n . Comme K est compact, cette suite admet une sous-suite (x_{n_k}) qui converge vers $x \in K$, et la continuité de f assure que $f(x_{n_k})$ converge vers $f(x) \in f(K)$, d'où la compacité de $f(K)$. □

Proposition I.7.4. (•) Soit f une fonction définie d'un compact K de (X, d) à valeurs dans \mathbb{R} , continue sur K . Alors f est bornée, et atteint ses bornes sur K .

Démonstration. L'image du compact K par f étant un compact de \mathbb{R} d'après la proposition I.7.3, il est borné (proposition I.6.4), la fonction f est donc majorée et minorée sur K . Notons M sa borne supérieure. Par définition il existe (x_n) dans K telle que

$$f(x_n) \rightarrow M = \sup_K f.$$

La suite maximisante (x_n) n'est pas nécessairement convergente, mais comme K est compact, on peut en extraire une sous-suite $(x_{\varphi(n)})$ qui converge vers $x \in K$. On a, par continuité de l'application, $f(x) = \lim f(x_{\varphi(n)}) = M$, la borne supérieure est donc atteinte. On montre de la même manière que la borne inférieure est atteinte. \square

Corollaire I.7.5. (•) Soit f une fonction continue d'un fermé borné $K \subset \mathbb{R}^d$, à valeurs dans \mathbb{R} . Alors f est bornée, et atteint ses bornes.

Exercice I.7.2. (•)

a) Soit f une fonction continue de \mathbb{R}^d dans \mathbb{R} . Montrer qu'elle est bornée sur tout ensemble borné de \mathbb{R}^d .

b) Montrer qu'une fonction définie d'un borné B de \mathbb{R}^d , continue, peut ne pas être bornée sur B .

Définition I.7.6. (Uniforme continuité)

Soit f une application f de (X, d) dans (X', d') . On dit que f est uniformément continue sur X si

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \eta > 0, \forall x, y \in X, d(x, y) < \eta \implies d'(f(x), f(y)) < \varepsilon.$$

I.8 Théorème de point fixe de Banach

Définition I.8.1. (Application contractante(•))

On dit qu'une application T de (X, d) dans lui-même est *contractante* s'il existe $\kappa \in [0, 1[$ tel que

$$d(T(x), T(y)) \leq \kappa d(x, y) \quad \forall x, y \in X.$$

Théorème I.8.2. (Théorème de point fixe de Banach (••))

Soit (X, d) un espace métrique complet et T une application de (X, d) dans lui-même, contractante. Elle admet alors un *point fixe* unique, c'est-à-dire qu'il existe un unique x dans X tel que $T(x) = x$.

Démonstration. L'unicité est immédiate : si x et y sont points fixes, on a

$$d(x, y) = d(T(x), T(y)) \leq \kappa d(x, y).$$

Comme $0 < \kappa < 1$, ça n'est possible que si $x = y$.

Pour l'existence, on considère un élément x_0 arbitraire de X , et l'on construit la suite des itérés par T :

$$x_n = T(x_{n-1}) = T^n(x_0) = \underbrace{T \circ T \circ \dots \circ T}_{n \text{ fois}}(x_0).$$

On a

$$d(x_{n+1}, x_n) = d(T(x_n), T(x_{n-1})) \leq \kappa d(x_n, x_{n-1}) \leq \dots \leq \kappa^n d(x_1, x_0).$$

On a donc, pour tous $p < q$,

$$\begin{aligned} d(x_p, x_q) &\leq d(x_p, x_{p+1}) + d(x_{p+1}, x_{p+2}) + \cdots + d(x_{q-1}, x_q) \\ &\leq (\kappa^p + \cdots + \kappa^{q-1}) d(x_1, x_0) \end{aligned}$$

qui tend vers 0 car la série $\sum \kappa^n$ est convergente. La suite (x_n) est donc de Cauchy, et converge vers un certain $x \in X$ car X est complet. Comme $d(x_{n+1}, x_n) = d(T(x_n), x_n)$ tend vers 0, on obtient en faisant tendre n vers $+\infty$, $d(T(x), x) = 0$, d'où $T(x) = x$. \square

I.9 Compléments sur les espaces vectoriels normés

Cette section est consacrée à une étude plus poussée des espaces vectoriels normés de dimension finie, qui se ramène à l'étude des espaces \mathbb{R}^n , pour n entier supérieur ou égal à 1. On rappelle la définition des normes usuelles sur \mathbb{R}^d (introduites dans la proposition I.2.8, page 9) :

$$\|x\|_p = \left(\sum_{k=1}^n |x_k|^p \right)^{1/p} \quad \text{pour } p \in [1, +\infty[,$$

ainsi que

$$\|x\|_\infty = \max_{1 \leq k \leq n} |x_k| .$$

Exercice I.9.1. (•) Proposer d'autres normes sur \mathbb{R}^n , en argumentant l'intérêt que l'on pourrait avoir à définir des normes qui sortent de la gamme de prêt-à-porter décrite ci-dessus.

Théorème I.9.1. (Équivalence des normes en dimension finie)

Toutes les normes sur \mathbb{R}^n sont équivalentes, c'est à dire que, pour toutes¹¹ normes $\|\cdot\|_\alpha$ et $\|\cdot\|_\beta$ sur \mathbb{R}^n , il existe deux constantes $M > m > 0$ telles que

$$m \|x\|_\alpha \leq \|x\|_\beta \leq M \|x\|_\alpha .$$

Démonstration. Nous allons montrer que toutes les normes sont équivalentes à la norme $\|\cdot\|_\infty$, ce qui établira l'équivalence de toutes les normes entre elles.

On montre dans un premier temps que toute application linéaire de $(\mathbb{R}^n, \|\cdot\|_\infty)$ dans $(\mathbb{R}^m, \|\cdot\|)$ (où $\|\cdot\|$ est une norme quelconque sur \mathbb{R}^m) est continue, et plus précisément que $\|F(x)\| \leq C \|x\|_\infty$. On écrit pour cela la décomposition d'un élément x de \mathbb{R}^n dans la base canonique, et l'on estime la norme de $F(x)$:

$$\left\| F \left(\sum_{i=1}^d x_i e_i \right) \right\| = \left\| \sum_{i=1}^d x_i F(e_i) \right\| \leq \sum_{i=1}^d |x_i| \|F(e_i)\| \leq M \max |x_i| = M \|x\|_\infty ,$$

où $M = \sum \|F(e_i)\|$. On a donc continuité de F car $F(x+h) = F(x) + F(h)$, et $\|F(h)\|$ peut être contrôlé par $\|h\|_\infty$ d'après ce qui précède.

On considère maintenant l'application identité de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^n , en munissant l'espace de départ de la norme $\|\cdot\|_\infty$, et l'espace d'arrivée d'une norme quelconque $\|\cdot\|$. D'après ce qui précède il existe une constante M telle que $\|x\| \leq M \|x\|_\infty$.

On considère maintenant la fonction qui à x dans $(\mathbb{R}^n, \|\cdot\|_\infty)$ associe $\|x\|$. Cette application est continue car (voir exercice I.2.5)

$$|\|x+h\| - \|x\|| \leq \|h\| \leq M \|h\|_\infty .$$

11. Malgré la notation, on peut envisager des normes qui diffèrent des normes p définies précédemment.

Comme l'image d'un compact par une application continue est compacte (proposition I.7.3, page 19), et que la sphère unité S de \mathbb{R}^n est compacte (proposition I.6.4), cette fonction atteint ses bornes sur S , en particulier son infimum $m \geq 0$. Il existe donc un x_0 , de norme ∞ égale à 1, tel que $\|x_0\| = m$. Comme x_0 est non nul, on a $m > 0$, et ainsi, pour tout x non nul,

$$\left\| \frac{x}{\|x\|_\infty} \right\| \geq m > 0 \implies m \|x\|_\infty \leq \|x\|.$$

On a donc montré

$$m \|x\|_\infty \leq \|x\| \leq M \|x\|_\infty,$$

c'est-à-dire que les normes $\|\cdot\|_\infty$ et $\|\cdot\|$ sont équivalentes. Toutes les normes sont donc équivalentes à une même norme $\|\cdot\|_\infty$, elles sont donc équivalentes entre elles. \square

Proposition I.9.2. On munit \mathbb{R}^n et \mathbb{R}^m de norme $\|\cdot\|_\alpha$ et $\|\cdot\|_\beta$, respectivement. Alors toute application F linéaire de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^m est continue, et il existe une constante $C \geq 0$ telle que, pour tout $x \in \mathbb{R}^n$,

$$\|Fx\|_\beta \leq C \|x\|_\alpha.$$

Démonstration. Cette propriété a été démontrée au début de la preuve de la proposition précédente pour la norme $\|\cdot\|_\infty$. Elle est donc vraie pour toute autre norme sur l'espace de départ d'après l'équivalence des normes qui vient d'être établie. \square

Le choix d'une norme¹² sur \mathbb{R}^n et \mathbb{R}^m induit canoniquement une norme sur l'espace vectoriel des applications linéaires de \mathbb{R}^n vers \mathbb{R}^m .

Proposition I.9.3. (Norme d'opérateur)

On note $\mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$ (ou simplement $\mathcal{L}(\mathbb{R}^n)$ si $m = n$) l'espace des applications linéaires de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^m . On note¹³ Fx l'image par F d'un élément x de \mathbb{R}^n . Pour tout $p \in [1, +\infty]$, l'application

$$F \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m) \longmapsto \|F\|_p = \sup_{x \neq 0} \frac{\|Fx\|_p}{\|x\|_p} = \sup_{\|x\|_p=1} \|Fx\|_p$$

définit une norme sur $\mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$, et l'on a, pour tout $x \in \mathbb{R}^n$,

$$\|Fx\|_p \leq \|F\|_p \|x\|_p.$$

On dit que cette norme d'opérateur est *subordonnée* à la norme p . Les normes ainsi définies sont compatibles avec le produit de composition, au sens suivant : pour tous $F \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^p, \mathbb{R}^m)$, $G \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^p)$

$$\|F \circ G\|_p \leq \|F\|_p \|G\|_p.$$

Dans le cas où l'on considère la norme euclidienne (cas $p = 2$), on omettra parfois l'indice, pour noter simplement $\|F\|$.

Démonstration. La propriété de séparation est immédiate, $\|F\|_p$ ne pouvant être nulle que si F est identiquement nulle. L'homogénéité résulte elle aussi directement de l'homogénéité de la norme p pour les vecteurs. Pour l'inégalité, on remarque que $\|F\|_p$ est le sup sur la sphère unité de $\|Fx\|_p$. Or on a, pour tous F_1, F_2 dans $\mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$, tout x de norme unitaire,

$$\sup_{\|x\|_p=1} (\|F_1x + F_2x\|_p) \leq \sup_{\|x\|_p=1} (\|F_1x\|_p + \|F_2x\|_p) \leq \sup_{\|x\|_p=1} \|F_1x\|_p + \sup_{\|x\|_p=1} \|F_2x\|_p.$$

12. Il peut s'agir de normes différentes, même si nous privilégierons ici le cas de normes de même type.

13. Cette notation Fx plutôt que $F(x)$ (qui peut aussi être utilisée) rappelle que l'on peut représenter F par une matrice, et donc l'image d'un élément de \mathbb{R}^n par un produit matrice-vecteur.

D'après la définition-même, on a $\|Fx\|_p / \|x\|_p \leq \|F\|_p$ pour tout x non nul, dont on déduit immédiatement $\|Fx\|_p \leq \|x\|_p \|F\|_p$.

Pour la composée d'applications, on écrit

$$\|F \circ G\|_p = \sup_{x \neq 0} \frac{\|F(G(x))\|_p}{\|x\|_p} \leq \sup_{x \neq 0} \frac{\|F\|_p \|G(x)\|_p}{\|x\|_p} = \|F\|_p \|G\|_p,$$

ce qui termine la preuve. □

Remarque I.9.4. Nous avons défini les normes d'opérateurs en munissant les espaces de départ et d'arrivée d'une même norme, mais on peut bien sûr étendre cette approche au cas où l'on choisit des normes différentes, en notant alors $\|F\|_{p,q}$ la norme subordonnée (p pour l'espace de départ, q pour l'espace d'arrivée).

Exercice I.9.2. Montrer que toutes les normes d'opérateurs que l'on peut définir selon les principes décrits ci-dessus à partir de normes sur \mathbb{R}^n et \mathbb{R}^m sont équivalentes entre elles.

I.10 Espaces vectoriels normés de dimension infinie

Cette section propose une introduction aux espaces vectoriels normés de dimension infinie, i.e. qui ne sont pas engendrés par un nombre fini d'éléments. On se gardera pourtant de dire qu'ils sont engendrés par nombre infini d'éléments car les bases vectorielles (dont on ne peut en général montrer l'existence que par un argument fondé sur l'axiome du choix) sont complètement *inutilisables* en général. La définition d'un espace vectoriel est en revanche exactement la même qu'en dimension finie, ainsi que la définition d'une norme (voir définition I.2.7, page 8).

Définition I.10.1. (Espace de Banach)

Soit E un espace vectoriel normé (e.v.n.). Si E est complet pour la distance associée à la norme, on dit que E est un espace de Banach.

On utilisera en général ce terme pour des espaces de dimension infinie, même si de fait tout espace de dimension finie est un espace de Banach (voir proposition I.5.5, page 16).

Exercice I.10.1. Montrer que l'espace vectoriel X des suites nulles au-delà d'un certain rang, muni de la norme ∞ , n'est pas complet. (Correction page 159)

Proposition I.10.2. Soit F une application linéaire de E dans F , deux espaces vectoriels normés. Alors F est continue si et seulement si elle est bornée sur la boule unité de E . On note $\mathcal{L}(E, F)$ l'espace vectoriel des applications linéaires continues de E dans F . C'est un e.v.n. pour la norme d'opérateur

$$\|T\| = \sup_{x \neq 0} \frac{\|Tx\|_F}{\|x\|_E}.$$

Si F est complet, alors $\mathcal{L}(E, F)$ est un espace de Banach.

Définition I.10.3. (Dual topologique)

Soit E un espace vectoriel normé (e.v.n.). On appelle dual topologique de E , et l'on note E' , l'ensemble des formes linéaires (applications linéaires à valeurs dans \mathbb{R}) continues. C'est un e.v.n. pour la norme

$$\|\varphi\| = \sup_{x \neq 0} \frac{|\langle \varphi, x \rangle|}{\|x\|_E}.$$

Remarque I.10.4. Si E est de dimension finie, toutes les formes linéaires sont continues. Ce n'est pas le cas en dimension infinie. Considérer par exemple l'espace vectoriel X des suites nulles au-delà d'un certain rang, muni de la norme $\|\cdot\|_\infty$. La forme

$$\varphi : u = (u_n) \mapsto \sum_{n=1}^{+\infty} u_n$$

(on gardera en tête qu'il s'agit en fait d'une somme *finie*) n'est pas bornée sur la boule unité, elle n'est donc pas continue¹⁴.

Définition I.10.5. (Séparabilité)

Un e.v.n. E est dit séparable s'il existe une partie dénombrable dense dans E .

Comme pour la complétude, cette propriété est immédiatement vérifiée pour tout e.v.n. de dimension finie (\mathbb{Q}^n est dense dans \mathbb{R}^n), elle n'a donc de pertinence que pour les espaces de dimension infinie.

14. On notera que l'exemple choisi s'appuie sur un e.v.n. qui n'est pas complet. De fait, on s'épargnera de chercher à construire un exemple explicite d'application linéaire non continue sur un espace complet, une telle construction ne peut qu'être abstraite et nécessite l'axiome du choix.

Exercice I.10.2. a) Montrer que l'espace ℓ^∞ , espace des suites réelles bornées muni de la norme

$$\|u\|_\infty = \sup |u_n|,$$

n'est *pas séparable*

b) Montrer qu'en revanche le sous-espace $c_0 \subset \ell^\infty$ des suites qui tendent vers 0 est séparable.
(Correction page 159)

c) Montrer que, pour $p \in [1, +\infty[$ l'espace

$$\ell^p = \left\{ u = (u_n) \in \mathbb{R}^\mathbb{N}, \sum u_n^p < +\infty \right\},$$

muni de la norme

$$\|u\| = \left(\sum_{n=0}^{+\infty} |u_n|^p \right)^{1/p},$$

est séparable.

I.11 Exercices

Exercice I.11.1. (Suite décroissante d'ensembles (•))

a) Donner un exemple de suite $(U_i)_{i \in \mathbb{N}}$ décroissante d'ouverts de \mathbb{R} , c'est-à-dire telle que $U_{i+1} \subset U_i$ pour tout i , qui soit telle que l'intersection des U_i est vide.

b) Donner un exemple de suite $(F_i)_{i \in \mathbb{N}}$ décroissante de fermés de \mathbb{R} , c'est-à-dire telle que $F_{i+1} \subset F_i$ pour tout i , qui soit telle que l'intersection des F_i est vide. (Correction page 159)

Exercice I.11.2. (Distance de Hamming)

On considère l'ensemble $H_N = \{0, 1\}^N$ des N -uplets de 0 ou de 1 (ensemble des mots de N bits).

1) On définit $d(x, y)$ comme le nombre de positions où les bits de x et y diffèrent, i.e.

$$x = (x_0 \dots, x_{N-1}), y = (y_0 \dots, y_{N-1}), d(x, y) = \sum_{n=0}^{N-1} |x_n - y_n|.$$

Montrer que l'on définit ainsi une distance (appelée distance de *Hamming*), qui fait de H_N un espace *discret*. Quel est le diamètre de H_N ?

2) Soit $x \in X$ et $r \in \mathbb{R}_+$. Donner le cardinal de la sphère de centre x et de rayon $r \geq 0$, en fonction de r . (Correction page 160)

Exercice I.11.3. (Distances ultramétriques (•••))

On considère l'ensemble $H_N = \{0, 1\}^N$ des N -uplets de 0 ou de 1 (ensemble des mots de N -bits).

Pour $x = (x_1 \dots, x_N)$ et $y = (y_1 \dots, y_N) \neq x$, on note k le plus petit indice tel que les bits de x et y diffèrent, i.e.

$$k = \min \{k, x_k \neq y_k\},$$

et l'on définit $\delta(x, y) = 2^{-k}$. On pose $\delta(x, x) = 0$.

1) Montrer que $\delta(\cdot, \cdot)$ est une distance sur H_N , et que cette distance est *ultramétrique*, c'est à dire qu'elle vérifie l'inégalité triangulaire renforcée

$$d(x, z) \leq \max(d(x, y), d(y, z)).$$

2) Montrer que tout point d'une boule est centre de cette boule (on se gardera d'essayer de faire un dessin...).

3) Quel est le diamètre de H_N pour cette distance ?

4) a) Décrire la sphère de centre $0 = (0, 0, \dots, 0)$ et de rayon $r \in [0, 1]$, selon la valeur de r , et plus généralement la sphère de centre $x = (x_1 \dots, x_N)$ et de rayon $r \in [0, 1]$.

b) Soient $x \in X$ et $r \in \mathbb{R}_+$. Donner le cardinal de la boule fermée de rayon x et de rayon r , en fonction de r .

5) Étendre l'approche précédente à l'ensemble $H_\infty = \{0, 1\}^{\mathbb{N}}$ des suites infinies de 0 ou 1.

6) Donner des exemples de contextes dans lesquels une distance ultramétrique apparaît naturellement.

(Correction page 160)

Exercice I.11.4. (••) Soit (X, d) un espace métrique, et $A \subset X$. Montrer que l'intérieur de A est égal au complémentaire de l'adhérence du complémentaire de A . (Correction page 160)

Exercice I.11.5. (•) Soit (X, d) un espace métrique, et A une partie de X . La distance d'un point x à l'ensemble est notée $d(x, A)$ (voir définition I.2.3 de la distance à un ensemble). Montrer

$$\bar{A} = \{x \in X, d(x, A) = 0\}, \quad \overset{\circ}{A} = \{x \in X, d(x, A^c) > 0\},$$

$$\partial A = \{x \in X, d(x, A) = d(x, A^c) = 0\}.$$

(Correction page 160)

Exercice I.11.6. (••) On se place sur $X = \mathbb{R}^2$ muni de la distance euclidienne.

a) Donner un exemple de partie $A \subset \mathbb{R}^2$ telle que la distance de x est atteinte pour certains points, et pas pour d'autres.

b) Donner un exemple de partie A , et d'un point $x \in \mathbb{R}^2$, tels que la distance de x à A est atteinte en plusieurs points.

c) (Cellules de Voronoï)

On considère la situation où A est une collection finie de points : $A = \{x_i\}_{1 \leq i \leq N}$. On appelle A_i l'ensemble des points qui sont strictement plus près de x_i que des autres x_j , autrement dit les points x tels que la distance de x à A est atteinte en x_i , et en x_i seulement. Décrire les A_i , appelées cellules de *Voronoi* dans les cas suivants

(i) Les x_i sont tous situés sur le premier axe de coordonnées.

(ii) Les x_i sont équidistribués sur le cercle unité.

Dans le cas général de points distribués de façon quelconque, faire un dessin de ces cellules de Voronoï.

d) (★) Pourquoi parle-t-on de téléphone *cellulaire* pour désigner un téléphone portable ?

(Correction page 161)

Exercice I.11.7. (Suite décroissante de compacts (•))

Soit $(K_n)_{n \in \mathbb{N}}$ décroissante de compacts non vides d'un espace métrique X . Montrer que l'intersection des K_n est non vide.

(Correction page 161)

Exercice I.11.8. (••)

a) Soit K un compact d'un espace métrique (X, d) . Montrer que, pour tout x , la distance de x à K (définition I.2.3, page 7) est atteinte.

b) Soit F un fermé non vide de \mathbb{R}^d . Montrer que la distance de tout x à F est atteinte.

Exercice I.11.9. (Distance de Hausdorff (•••))

Soit (X, d) un espace métrique. On note \mathcal{K} l'ensemble des parties *compactes* de X . Pour tous K_1, K_2 dans \mathcal{K} , on définit la quantité

$$d_H(K_1, K_2) = \max \left(\sup_{x_1 \in K_1} d(x_1, K_2), \sup_{x_2 \in K_2} d(x_2, K_1) \right).$$

a) Montrer que les sup dans l'expression ci-dessus sont en fait des max, et que $d_H(\cdot, \cdot)$ définit une distance sur \mathcal{K} .

b) Explorer la possibilité de définir une telle quantité afférentes à deux ensembles si l'on ne se restreint pas à des compacts.

c) Donner l'expression de la distance d'un compact K à sa frontière ∂K pour les formes géométriques suivantes de \mathbb{R}^2 (muni de la distance euclidienne standard) : cercle, segment, disque, carré, rectangle, triangle, ellipse.

d) Expliquer comment cette notion peut être utilisée pour *métriser* l'ensemble des fonctions continues de l'intervalle $[0, 1]$ dans \mathbb{R} , et vérifier que la distance ainsi construite diffère de celle issue la norme de la convergence uniforme définie par $d_\infty(f, g) = \max_{[0,1]} |f(x) - g(x)|$.

e)(•••) Montrer que si X est complet, alors l'espace métrique (X, d_H) l'est aussi.

(Correction page 161)

Exercice I.11.10. (••) Soit (X, d) un espace métrique, et A une partie non vide de X . La distance d'un point x de X à A est définie (voir définition I.2.3) comme l'infimum des distances de x à a , pour a parcourant A .

a) Montrer que l'application $d(\cdot, A)$ de X dans \mathbb{R}_+ qui à x associe $d(x, A)$ est 1 - *lipschitzienne*, c'est à dire que

$$|d(x, A) - d(y, A)| \leq d(x, y),$$

et en déduire qu'elle est continue.

b) (★) On se place sur la France munie de la métrique euclidienne vol d'oiseau, et l'on prend pour A la réunion de toutes les zones urbaines. Décrire les propriétés de la fonction $d(\cdot, A)$, et proposer une procédure de choix d'emplacements de villes nouvelles, par accroissement de A de façon par exemple à réduire le max de $d(\cdot, A)$. (Correction page 161)

Exercice I.11.11. On se place sur \mathbb{R}^2 . Analyser le problème consistant à minimiser $\|x\|_1$ sur un demi plan (on pourra faire un dessin).

Généraliser

(Correction page 162)

Exercice I.11.12. (•••) a) Pourquoi a-t-on exclu le cas $p \in [0, 1[$ dans la définition des normes p ? Qu'advient-il de la quantité

$$C_P(x) = \sum_{k=1}^d |x_k|^p$$

quand, pour un $x \in \mathbb{R}^d$ donné, on fait tendre p vers 0? On notera $C_0(x)$ cette limite

b) Quel peut être l'intérêt de considérer de telles expressions pour p petit? (Correction page 162)

Exercice I.11.13. (••) Préciser les valeurs des constantes d'équivalences optimales entre la norme ∞ et les différentes normes p , pour $p \in [1, +\infty[$.

Qu'advient il de ces constantes lorsque la dimension n de l'espace tend vers $+\infty$? (Correction page 162)

Exercice I.11.14. (★) La direction d'une école d'ingénieurs prestigieuse décide facétieusement de changer sa procédure de calcul des moyennes, en la remplaçant par (on désigne par x_1, \dots, x_n les notes d'un élève)

$$m_p = \frac{1}{n^{1/p}} \|x\|_p,$$

pour un certain $p \in]1, +\infty]$.

a) Justifiez le fait qu'il s'agit bien d'une moyenne, et expliquer pourquoi l'on peut s'attendre à ce que les élèves se réjouissent à première vue de cette nouvelle.

b) S'agissant d'un concours, seul le classement est véritablement important. Dans cette optique, expliquer pourquoi certains compétiteurs puissent se sentir lésés, d'autres au contraire avantagés, en précisant les profils de ces deux types d'élèves. (Correction page 163)

Exercice I.11.15. (••) Soit f une application continue d'un compact K dans \mathbb{R} . Montrer que f est *uniformément* continue, c'est à dire que

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \eta, \forall x, y, d(x, y) \leq \eta \implies |f(y) - f(x)| < \varepsilon.$$

(Correction page 163)

Exercice I.11.16. (••) Soit f une fonction continue de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R} .

a) Montrer que si l'on a

$$\lim_{\|x\| \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$$

alors l'image réciproque par f de tout compact est un compact.

b) Montrer réciproquement que si l'image réciproque par f de tout compact est un compact, alors $|f(x)|$ tend vers $+\infty$ quand $\|x\|$ tend vers $+\infty$.

c)(•••) Montrer que, si $n \geq 2$, alors la conclusion de la question précédente peut être précisée : $f(x)$ converge vers $+\infty$ quand $\|x\|$ tend vers $+\infty$, ou $f(x)$ converge vers $-\infty$ quand $\|x\|$ tend vers $+\infty$. Qu'en est-il du cas $n = 1$?

d) Soit f une fonction continue qui vérifie la propriété du a) (on dit que f est *coercive*, ou parfois dans certains contextes que f est *propre*). Montrer que f est minorée sur \mathbb{R}^n , et qu'elle atteint son minimum. (Correction page 164)

Exercice I.11.17. (••) Donner un exemple d'application de \mathbb{R}_+ dans \mathbb{R}_+ qui vérifie $|T(x) - T(y)| < |x - y|$ pour tous $x \neq y$, mais qui n'est pas contractante. (Correction page 164)

Exercice I.11.18. (••) Soit (X, d) un espace métrique complet et T une application de (X, d) dans lui-même. On suppose qu'il existe $p \in \mathbb{N}$ tel que

$$T^p = \underbrace{T \circ T \circ \dots \circ T}_{p \text{ fois}}$$

soit contractante. Montrer que T admet un unique point fixe.

(Correction page 164)

Exercice I.11.19. (•)

a) Quelle est la norme (subordonnée à la norme euclidienne) d'une application de \mathbb{R}^n dans lui-même représentée dans la base orthonormée canonique de \mathbb{R}^n par une matrice diagonale $A = \text{diag}(a_1, \dots, a_n)$?

b) Quelle est la norme d'une application représentée dans la base orthonormée canonique de \mathbb{R}^n par une matrice A symétrique ?

Exercice I.11.20. (•)

On considère l'espace vectoriel des suites bornée

$$\ell^\infty = \{u = (u_n) \in \mathbb{R}^\mathbb{N}, \sup |u_n| < +\infty\},$$

muni de la norme de la convergence uniforme $\|u\| = \sup |u_n|$.

Montrer que cette espace est complet, et que sa boule unité fermée n'est pas compacte. (Correction page 165)

Chapitre II

Calcul Différentiel

Sommaire

II.1	Dérivées partielles, notion de différentielle	31
II.1.1	Définitions, premières propriétés	31
II.1.2	Compléments	37
II.1.3	Théorème fondamental de l'analyse	41
II.2	Exercices	42
II.3	Théorèmes des fonctions implicites et d'inversion locale	47
II.4	Exercices	52
II.5	Dérivées d'ordre supérieur	55
II.5.1	Dérivées partielles d'ordre supérieur pour les fonctions scalaires	55
II.5.2	Différentielles d'ordre supérieur pour les fonctions de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^m	58
II.6	Éléments d'analyse fonctionnelle	59
II.7	Exercices	61

II.1 Dérivées partielles, notion de différentielle

II.1.1 Définitions, premières propriétés

On sait qu'une fonction f , définie d'un intervalle ouvert $I \subset \mathbb{R}$ à valeurs dans \mathbb{R} , est dérivable en $x \in I$ si le taux de variation admet une limite, notée alors $f'(x)$, lorsque h tend vers 0 :

$$\frac{f(x+h) - f(x)}{h} = f'(x) + \varepsilon(h),$$

où $\varepsilon(h)$ tend vers 0 quand h tend vers 0.

On a alors

$$f(x+h) = f(x) + f'(x)h + \varepsilon(h)h = f(x) + f'(x)h + o(h), \quad (\text{II.1.1})$$

où $o(h)$ (que l'on peut aussi écrire $h\varepsilon(h)$) est une fonction définie au voisinage de 0, négligeable devant $|h|$. Ce développement exprime le fait que la fonction peut être approchée à l'ordre 1 au voisinage de x par une application affine.

Inversement, si une fonction f admet au voisinage de x un développement limité du type de (II.1.1) :

$$f(x+h) = f(x) + \gamma h + o(h),$$

alors la fonction est dérivable en x , et le coefficient du terme de premier ordre est $\gamma = f'(x)$, la dérivée de f en x .

Cette approche s'étend sans difficultés au cas où la fonction est à valeurs vectorielles. Considérons

$$f : x \in \mathbb{R} \mapsto f(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x)) \in \mathbb{R}^m.$$

Si dérivée de chacune des composantes f_i par rapport à la variable réelle est définie en $x \in \mathbb{R}$, la dérivée $f'(x)$ s'écrit

$$f'(x) = (f'_1(x), f'_2(x), \dots, f'_m(x)),$$

et le développement limité est simplement écrit dans \mathbb{R}^m .

Nous allons nous intéresser maintenant la généralisation de ces notions au cas où l'espace de départ lui-même peut être de dimension strictement supérieure à 1, l'objet typique étudié à partir de maintenant sera donc une application

$$f : x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n \mapsto f(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x)) \in \mathbb{R}^m$$

où chacune des m composantes f_i est une application de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R} .

Exemple II.1.1. (Champ de vecteurs, champs scalaire)

Un *champ de vecteurs* dans l'espace physique est une application qui à chaque point \mathbb{R}^3 associe un vecteur de \mathbb{R}^3 . On le note en général $u = (u_1, u_2, u_3)$ où chaque composante u_i est une fonction de $x = (x_1, x_2, x_3)$. Il peut encoder un champ de vitesses fluides à un instant donné, ou un champ de déformations infinitésimales au sein d'un objet élastique déformable. Un champ de vecteurs dans le plan (par exemple un champ de vitesses horizontales à la surface d'un lac) correspond au cas $n = m = 2$.

On parle d'un *champ scalaire* lorsque l'espace d'arrivée est \mathbb{R} (cas $n = 3$ et $m = 1$ pour un champ de l'espace physique). Cela correspond par exemple au champ de température dans une zone de l'espace à un instant donné.

Exemple II.1.2. On peut considérer les versions dynamiques des exemples ci-dessus en rajoutant une variable de temps dans l'espace de départ. Par exemple un champ de vitesse variable en temps correspond au cas $n = 4$, $m = 3$, il peut être considéré comme une application $\mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}$ dans \mathbb{R}^3 , qui à chaque $(x, t) = (x_1, x_2, x_3, t)$ fait correspondre un vecteur $(u_1(x, t), u_2(x, t), u_3(x, t))$.

Si l'on cherche à écrire un développement limité du type (II.1.1), l'identité est à valeurs dans \mathbb{R}^m , et la variation h de la variable x de l'espace de départ vit dans \mathbb{R}^n . Le terme $f'(x)h$ doit être remplacé par un terme à valeurs dans \mathbb{R}^m , qui dépend linéairement du vecteur $h \in \mathbb{R}^n$, il s'écrit donc sous la forme d'une application linéaire (de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^m) appliquée à la variation $h \in \mathbb{R}^n$. Cette section décrit la démarche permettant d'écrire dans ce contexte multidimensionnel le développement limité d'une fonction de n variables, à valeurs dans \mathbb{R}^m , c'est à dire d'approcher localement une fonction générale par une fonction *affine*.

La notion de *différentielle*, qui généralise la notion de dérivée d'une fonction de \mathbb{R} dans \mathbb{R} , peut se définir de façon abstraite, y compris pour des espaces de dimension infinie. Nous débutons néanmoins ce chapitre par la notion plus directement accessible et utilisable de dérivée partielle, pour des fonctions de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^m .

Dérivées partielles

Définition II.1.1. (Dérivées partielles, matrice jacobienne)

Soit f une application définie d'un ouvert $U \subset \mathbb{R}^n$ dans \mathbb{R}^m , et $x = (x_1, \dots, x_n) \in U$. On dit que f

admet en x une dérivée partielle par rapport à la variable x_j si l'application de \mathbb{R} dans \mathbb{R}^m obtenue en figeant toutes les variables sauf la j -ième est dérivable en x_j . Plus formellement, si

$$y \mapsto f(x_1, \dots, x_{j-1}, y, x_{j+1}, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^m$$

définie d'un voisinage de x_j vers \mathbb{R}^m , est dérivable en $y = x_j$.

La dérivée de la i -ème composante de f par rapport à la variable x_j , telle que définie ci-dessus, est alors notée¹

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_j}(x) \text{ ou } \partial_{x_j} f_i(x) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{f_i(x + s e_j) - f_i(x)}{s},$$

où l'on a noté e_j le j -ème vecteur de la base canonique de \mathbb{R}^n . Si toutes les dérivées partielles des f_i par rapport aux x_j existent, on appelle *matrice Jacobienne* la matrice

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \frac{\partial f_m}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{mn}(\mathbb{R}).$$

Exercice II.1.1. Écrire la matrice jacobienne (en justifiant son existence) de l'application

$$f : (x_1, x_2, x_3, x_4) \in \mathbb{R}^4 \mapsto \begin{pmatrix} 2x_1 + x_2 + 3x_3 \\ x_1 x_2^2 x_3^4 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2.$$

(Correction page 165)

Remarque II.1.2. La définition des dérivées partielles se base sur des variations, autour du point considéré, dans les directions des axes de coordonnées, et dans ces directions seulement. Il est possible que la fonction ait un comportement pathologique si l'on considère des variations dans d'autres directions. On peut par exemple imaginer une fonction qui ne varie pas lorsque l'on perturbe selon une direction de coordonnées (on aura alors existence de dérivées partielles nulles), mais qui a un comportement très singulier dans d'autres directions (voir exercice II.1.3 ci-après). L'existence d'une matrice jacobienne (et son expression le cas échéant), n'est donc pas une propriété intrinsèque, elle dépend du système de coordonnées choisi.

Nous allons à présent définir la notion plus intrinsèque de différentiabilité d'une application de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^m , dont la définition ne repose pas sur un système de coordonnées particulier. La définition repose sur l'existence d'un développement limité *uniforme* vis-à-vis de la direction de variation. Lorsque $n = 1$, nous avons rappelé précédemment que l'existence d'un développement limité est équivalente à l'existence d'une dérivée. Comme nous le verrons, cette équivalence *ne se généralise pas* au cas où l'espace de départ est de dimension ≥ 2 : l'existence de dérivées partielles en un point ne garantit pas la différentiabilité.

Notation II.1.3. (Image par une application linéaire et produit matrice vecteur)

Nous adoptons dans ce qui suit une convention courante dans le contexte du calcul différentiel (et en particulier en mécanique des fluides), qui est de noter $F \cdot x$ l'image par une application linéaire F d'un

1. Nous commettons ici un abus de notation si courant qu'il nous paraît préférable de le commettre en connaissance de cause, plutôt que de le contourner. Dans ce qui suit x_j dans $\partial f_i / \partial x_j$ encode le fait que l'on dérive par rapport à la j -ième variable. Mais quand on écrit $x = (x_1, \dots, x_j, \dots, x_n)$, x_j désigne un réel, qui est la valeur particulière de la j -ième composante du point x considéré.

vecteur x . De la même manière, si A est une matrice, écrira $A \cdot x$ le produit matrice vecteur. Cette notation est issue de ce que l'on appelle le calcul tensoriel², qui n'est pas abordé en tant que tel dans ce cours.

Définition II.1.4. (Différentielle (•))

Soit f une application définie d'un ouvert $U \subset \mathbb{R}^n$ dans \mathbb{R}^m . On dit que f est différentiable en $x \in U$ s'il existe une application linéaire de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^m , notée $df(x)$, telle que

$$f(x+h) = f(x) + df(x) \cdot h + o(h) \quad (\text{II.1.2})$$

où $o(h)$ est une application de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^m négligeable devant $\|h\|$, c'est à dire telle que $o(h)/\|h\|$ tend vers 0 quand h tend vers 0. On appelle $df(x)$ la *différentielle* de f en x .

Exercice II.1.2. a) Montrer que l'application suivante est différentiable, et préciser sa différentielle

$$f : (x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3 \mapsto x_1 x_2^2 x_3^3$$

b) Préciser le domaine de différentiabilité de l'application

$$x \in \mathbb{R}^n \mapsto \|x\|$$

et exprimer sa différentielle lorsqu'elle existe.

(Correction page 166)

Proposition II.1.5. Toute application différentiable en un point est continue en ce point.

Démonstration. C'est une conséquence directe du développement limité (II.5.2), qui assure que $f(x+h)$ tend vers $f(x)$ quand h tend vers 0. \square

Définition II.1.6. (Continue différentiabilité (•))

Une application f d'un ouvert $U \subset \mathbb{R}^n$ dans \mathbb{R}^m est dite *continûment différentiable* sur U si elle est différentiable en tout $x \in U$, et si l'application $x \mapsto df(x)$ est continue sur U (l'espace d'arrivée est muni canoniquement de la norme d'opérateur subordonnée à la norme euclidienne, voir proposition I.9.3, page 22).

Lien entre différentielle et matrice jacobienne

Lorsque la différentielle existe, sa représentation dans les bases canoniques de \mathbb{R}^n et \mathbb{R}^m est la matrice jacobienne définie ci-dessus.

Proposition II.1.7. Soit f une application définie d'un ouvert $U \subset \mathbb{R}^n$ dans \mathbb{R}^m . Si f est différentiable en $x \in U$, alors elle admet des dérivées partielles dans toutes les directions, et sa différentielle admet pour représentation matricielle la matrice jacobienne J définie ci-dessus : c'est-à-dire que f s'écrit

$$f(x+h) = f(x) + J(x) \cdot h + o(h).$$

Démonstration. Si f est différentiable en x , on peut écrire le développement limité composante par composante), en prenant la variation h de la forme se_j , où s est un réel et e_j un vecteur unitaire de la base canonique \mathbb{R}^n : pour tout $i = 1, \dots, m$, tout $j = 1, \dots, n$,

$$f_i(x + se_j) = f_i(x) + s(df(x) \cdot e_j)_i + o(s).$$

2. On pourra se reporter à http://mms2.enscm.fr/mmc_st_etienne_fort/calcul_tensoriel/polycop/tenseurs_poly.pdf pour une présentation détaillée de ces notions.

On a donc

$$(df(x) \cdot e_j)_i = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{f_i(x + se_j) - f_i(x)}{s} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}$$

d'après la définition II.1.1), c'est-à-dire le coefficient (i, j) de la matrice jacobienne J . Ce coefficient s'identifie donc à la composante i de l'image du j -ème vecteur de la base canonique par la différentielle, ce qui termine la preuve. \square

Comme nous l'avons déjà évoqué, dès que la dimension n de l'espace de départ est strictement plus grande que 1, l'existence d'une matrice jacobienne (c'est à dire l'existence de toutes les dérivées partielles) *n'implique pas* la différentiabilité. Une application peut même admettre une matrice jacobienne en un point sans pour autant être continue en ce point (voir exercice II.1.3 ci-dessous). On verra néanmoins que, si une application admet sur un ouvert U des dérivées partielles qui sont toutes *continues* sur U , alors l'application est continûment différentiable sur U (voir proposition II.1.8 ci-après).

Exercice II.1.3. Montrer que la fonction

$$(x, y) \in \mathbb{R}^2 \setminus \{(0, 0)\} \mapsto \frac{xy}{x^2 + y^2}, \quad f(0, 0) = 0,$$

admet en $(0, 0)$ des dérivées partielles, mais n'est pas continue en ce point (et donc non différentiable d'après la proposition II.1.5. (Correction page 166)

Exercice II.1.4. (•) Montrer que toute application affine définie d'un ouvert de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^m :

$$x \mapsto f(x) = A \cdot x + b, \quad A \in \mathcal{M}_{mn}(\mathbb{R}), \quad b \in \mathbb{R}^m,$$

est continûment différentiable sur cet ouvert, et préciser sa différentielle. (Correction page 166)

Exercice II.1.5. (•) a) Soient f et g deux applications différentiables sur un ouvert $U \subset \mathbb{R}^2$, à valeurs dans \mathbb{R} . Exprimer la différentielle de l'application produit

$$F : (x_1, x_2) \in U \mapsto f(x_1, x_2)g(x_1, x_2).$$

b) Soient f (respectivement g) une application différentiable sur un ouvert U (respectivement V) de \mathbb{R}^2 dans \mathbb{R} . Exprimer la différentielle de l'application

$$G : (x_1, x_2, x_3, x_4) \in U \times V \mapsto f(x_1, x_2)g(x_3, x_4),$$

et écrire sa jacobienne en fonctions de celles de f et g . On pourra utiliser la notation $x_{12} = (x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2$, $h_{12} = (h_1, h_2) \in \mathbb{R}^2$, et de même pour les indices 3 et 4. (Correction page 166)

D'après la proposition II.1.7, si une application est continûment différentiable sur un ouvert U , alors la matrice jacobienne est définie en tout point de cet ouvert, et la correspondance $x \mapsto J(x)$ est continue. La proposition suivante assure la réciproque de cette propriété.

Proposition II.1.8. (••) Soit f une application définie d'un ouvert $U \subset \mathbb{R}^n$ dans \mathbb{R}^m . On suppose que la matrice jacobienne $J(x)$ est définie en chaque point x de U , et que l'application $x \mapsto J(x)$ est continue. Alors f est continûment différentiable sur U .

Démonstration. On écrit la démonstration pour le cas $n = 2$, et l'on suppose que $(0, 0) \in U$ pour simplifier les notations. Nous allons montrer la différentiabilité en $(0, 0)$, la démonstration pour les autres points étant essentiellement la même. Pour h_1, h_2 suffisamment petits, on a

$$f(h_1, h_2) = f(h_1, h_2) - f(h_1, 0) + f(h_1, 0) - f(0, 0) + f(0, 0).$$

On écrit

$$f(h_1, 0) - f(0, 0) = h_1 \int_0^1 \partial_1 f(th_1, 0) dt.$$

Comme $x \mapsto J(x)$ est continue, tous les coefficients de la matrice J sont des fonctions continues en x . On a donc en particulier $\partial_1 f(th_1, 0) = \partial_1 f(0, 0) + \varepsilon(th_1)$, et ainsi³

$$f(h_1, 0) - f(0, 0) = h_1 \partial_1 f(0, 0) + h_1 \varepsilon(h_1).$$

On a par ailleurs

$$f(h_1, h_2) - f(h_1, 0) = h_2 \int_0^1 \partial_2 f(h_1, th_2) dt,$$

avec, par continuité des dérivées partielles,

$$\partial_2 f(h_1, th_2) = \partial_2 f(0, 0) + \varepsilon(h_1, th_2).$$

On a donc⁴

$$f(h_1, h_2) - f(h_1, 0) = h_2 \partial_2 f(0, 0) + h_2 \varepsilon(h).$$

On a donc finalement

$$f(h_1, h_2) = f(0, 0) + h_1 \partial_1 f(0, 0) + h_2 \partial_2 f(0, 0) + o(h),$$

qui exprime la différentiabilité de f en $(0, 0)$, et de la même manière en tout point de l'ouvert U . La différentielle peut s'exprimer matriciellement à partir de la jacobienne $J = [\partial_1 f, \partial_2 f]$ (écriture de la matrice en colonnes, chacune des dérivées partielles étant un vecteur de \mathbb{R}^m). Les dérivées partielles étant continues, la correspondance $x \mapsto J(x)$ est continue, l'application est donc continûment différentiable sur U .

La réciproque est une conséquence directe de la proposition II.1.7. \square

Proposition II.1.9. (Différentielle de la composée de deux applications)

Soient g une application définie d'un ouvert $U \subset \mathbb{R}^n$ dans \mathbb{R}^p , et f définie d'un ouvert $V \subset \mathbb{R}^p$ dans \mathbb{R}^m . On suppose que $g(U) \subset V$. Si g est différentiable en $x \in U$ et f est différentiable en $g(x)$, alors $f \circ g$ est différentiable en x , et l'on a

$$d(f \circ g)(x) = df(g(x)) \circ dg(x).$$

Démonstration. On a

$$\begin{aligned} f \circ g(x + h) - f \circ g(x) &= f(g(x) + dg(x) \cdot h + o(h)) \\ &= f(g(x)) + df(g(x)) \cdot (dg(x) \cdot h + o(h)) + o(dg(x) \cdot h + o(h)) \\ &= f \circ g(x) + (df(g(x)) \circ dg(x)) \cdot h + o(h), \end{aligned}$$

qui exprime la différentiabilité de $f \circ g$, avec l'expression annoncée de la différentielle. \square

3. La fonction $s \mapsto \varepsilon(s)$ est une fonction définie d'un voisinage de 0 dans \mathbb{R} , à image dans \mathbb{R}^m , qui tend vers 0 quand s tend vers 0, on a donc : pour tout $\epsilon > 0$, il existe η tel que pour tout h_1 avec $|h_1| < \eta$, $\|\varepsilon(h_1)\| < \epsilon$. Pour un tel h_1 , pour tout $t \in [0, 1]$, on a aussi $|th_1| < \eta$, et donc $\|\varepsilon(th_1)\| < \epsilon$. Par suite

$$\left\| \int_0^1 \varepsilon(th_1) dt \right\| \leq \int_0^1 \|\varepsilon(th_1)\| dt \leq 1 \times \eta = \eta.$$

L'intégrale est donc un $\varepsilon(h_1)$, c'est-à-dire une fonction qui tend vers 0 quand h_1 tend vers 0.

4. Comme précédemment, l'intégration en t entre 0 et 1 du $\varepsilon(h_1, th_2)$ donne un $\varepsilon(h)$, qui n'est plus la même fonction ε que précédemment, conformément à l'usage, mais qui tend bien vers 0 quand h tend vers 0.

Exercice II.1.6. a) Soit A une matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, $a \in \mathbb{R}^n$, et f une application différentiable de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^m . Exprimer la différentielle et la matrice jacobienne de $F : x \mapsto f(b + Ax)$.

b) Soit f une fonction dérivable de \mathbb{R} dans \mathbb{R} . Déterminer la différentielle de

$$F : (x, y) \in \mathbb{R}^2 \longmapsto f(x^2 + y^2),$$

et écrire le développement limité de F au voisinage d'un point $(x, y) : F(x + h_x, y + h_y) = \dots$
(Correction page 167)

Remarque II.1.10. (Et en pratique, on fait comment ?)

Les définitions ci-dessus suggèrent deux stratégies pour étudier la différentiabilité d'une application donnée, et préciser sa différentielle : calculer sa matrice jacobienne J_f , et identifier le domaine sur lequel elle est définie et continue, ou effectuer un développement limité $J(f + h)$ et en extraire la partie d'ordre 1 en h . Chacune de ses approches peut se révéler la plus pertinente dans certains cas. Ainsi pour l'application de l'exercice II.1.1, il est plus aisé d'écrire directement la matrice jacobienne que d'effectuer le développement limité. Pour la seconde application de l'exercice II.1.2 en revanche, le développement limité permet d'arriver de façon plus élégante à l'expression de la différentielle. Noter qu'en dimension infinie la notion de différentielle peut se définir comme nous l'avons fait en dimension finie, alors que la notion de matrice jacobienne n'a a priori pas de sens. L'approche par développement limité est de ce point de vue plus générale, et plus universelle puisqu'elle ne dépend pas des bases des espaces de départ ou d'arrivée.

II.1.2 Compléments

Proposition II.1.11. (Linéarité de la différentiation)

Soient f et g des applications définies d'un ouvert $U \subset \mathbb{R}^n$ dans \mathbb{R}^m . Si f et g sont différentiables en $x \in U$, alors, pour tous λ, μ réels, l'application $\lambda f + \mu g$ est différentiable, et l'on a

$$d(\lambda f + \mu g) = \lambda df + \mu dg.$$

Démonstration. C'est une conséquence immédiate de la définition de la différentiabilité. \square

Corollaire II.1.12. L'ensemble $C^1(U, \mathbb{R}^m)$ des applications continûment différentiables sur un ouvert U de \mathbb{R}^n est un espace vectoriel.

Notion de gradient

Lorsqu'une fonction différentiable est à valeurs dans \mathbb{R} , la différentielle est une *forme linéaire*, c'est-à-dire une application linéaire de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R} . Elle peut alors s'exprimer⁵ à l'aide du produit scalaire canonique sur \mathbb{R}^n , et s'identifie par ce biais à un vecteur de \mathbb{R}^n . C'est ce vecteur que l'on appelle gradient de f .

Définition II.1.13. (Gradient)

Soit f une application définie d'un ouvert $U \subset \mathbb{R}^n$ dans \mathbb{R} . On suppose que f est différentiable en $x \in U$. Il existe alors un unique vecteur, noté $\nabla f(x)$, tel que

$$df(x) \cdot h = \langle \nabla f(x) | h \rangle \quad \forall h \in \mathbb{R}^n,$$

5. Lorsque l'on travaille sur \mathbb{R}^n , l'usage de la base orthonormée canonique et du produit scalaire canonique sont tellement naturels que l'on a tendance à identifier spontanément la différentielle et le gradient. On prendra cependant garde au fait que le gradient n'est pas défini de façon intrinsèque. Contrairement à la différentielle, qui est une application définie de façon non ambiguë par le développement limité, ce gradient dépend du produit scalaire choisi. Ce point est particulièrement sensible dans certaines situations, notamment en dimension infinie, où plusieurs produits scalaires "naturels" peuvent co-exister.

où $\langle \nabla f(x) | h \rangle$ représente le produit scalaire canonique sur \mathbb{R}^n .

Conformément à la proposition II.1.7, ce gradient s'écrit dans la base canonique

$$\nabla f(x) = (\partial_{x_1} f(x), \partial_{x_2} f(x), \dots, \partial_{x_n} f(x)) \in \mathbb{R}^n.$$

Exercice II.1.7. Reprendre l'exercice II.1.6 (en supposant $m = 1$ pour la première question), en précisant dans chaque cas le gradient de F en fonction de celui de f . (Correction page 167)

Il sera utile dans certaines applications d'utiliser la notion de *gradient partiel*. Cela consiste simplement à considérer une fonction de n variables comme une fonction d'une partie de ces variables, les autres étant gelées. La définition ci-dessous précise cette notion dans le cas général, que nous illustrons au préalable sur un cas particulier. Considérons une fonction de \mathbb{R}^3 dans \mathbb{R} , différentiable en un point $x = (x_1, x_2, x_3)$. Son gradient en x est un vecteur de \mathbb{R}^3 . Si on la considère maintenant comme une fonction de (x_1, x_2) , avec x_3 fixé à sa valeur correspondant à x , le gradient de cette nouvelle fonction est un vecteur de \mathbb{R}^2 , que l'on pourra noter $\nabla_{x_1 x_2} f$, ou $\nabla_{x_{12}} f$.

Définition II.1.14. (Gradient partiel)

Soit f une application définie d'un ouvert $U \subset \mathbb{R}^n$ dans \mathbb{R} , différentiable en un point $x \in U$. On écrit $\mathbb{R}^n = \mathbb{R}^{n_1} \times \dots \times \mathbb{R}^{n_p}$, de telle sorte que x peut s'écrire⁶ $x = (x_1, \dots, x_p)$, avec $x_j \in \mathbb{R}^{n_j}$. Pour i entre 1 et p , on considère la fonction partielle qui ne dépend que du vecteur x_j , les autres étant figées. Le gradient de cette fonction partielle est un vecteur de \mathbb{R}^{n_j} , on le note $\nabla_{x_j} f$.

Cette notion de gradient partiel est notamment très utile en pratique lorsque l'on définit un potentiel d'interaction sur un système de particules localisées en q_1, q_2, \dots, q_N , chacun des q_i étant un point de l'espace physique \mathbb{R}^3 . Si l'on définit un potentiel d'interaction sur le système comme une fonction Φ de $q = (q_1, \dots, q_N) \in \mathbb{R}^{3N}$, la force exercée sur la particule i dérivant de ce potentiel d'interaction est simplement $-\nabla_{q_i} \Phi \in \mathbb{R}^3$. On se reportera à l'exercice II.2.7, page 45, pour une étude plus approfondie de ces systèmes de particules en interaction, et l'utilisation dans ce cadre de la notion de gradient partiel.

Remarque II.1.15. Si l'on considère le gradient partiel d'une fonction de $\mathbb{R}^n = \mathbb{R} \times \dots \times \mathbb{R}$ vis-à-vis d'une unique variable x_i , on retrouve la notion de dérivée partielle par rapport à x_i déjà introduite.

Définition II.1.16. (Différentielle partielle)

On définit de façon tout à fait analogue une notion de différentielle partielle, pour des applications de \mathbb{R}^n vers \mathbb{R}^m . Si l'on écrit comme précédemment

$$x = (x_1, \dots, x_p) \in \mathbb{R}^{n_1} \times \dots \times \mathbb{R}^{n_p},$$

la différentielle partielle par rapport à x_i , que l'on notera⁷ $\partial_{x_i} f$, est alors une application linéaire de \mathbb{R}^{n_i} dans \mathbb{R}^m .

Exercice II.1.8. (Dépendance du gradient vis-à-vis du produit scalaire)

Comme indiqué précédemment, le gradient dépend du produit scalaire sous-jacent. Dans le cadre de ce cours, nous utiliserons cette notion essentiellement en lien avec le produit scalaire canonique de \mathbb{R}^n , parfois sans re-préciser qu'il s'agit bien de ce produit scalaire. Cette exercice illustre le fait qu'il

6. Attention, x_j désigne dans ce qui suit non plus une variable scalaire, mais un groupe de n_j variables scalaires.

7. Cette notation est la plus couramment utilisée, et nous en recommandons l'usage, tout en reconnaissant qu'il aurait été assez naturel d'utiliser la notation d_{x_i} , puisqu'il s'agit d'une application linéaire, définie de façon intrinsèque comme associant à tout vecteur un vecteur, indépendamment du choix d'une base. La notation ' ∂ ' a pour l'instant été utilisée pour représenter des dérivées partielles, qui repose sur le choix d'un système de coordonnées. Dans le cas présent, on est un peu entre les deux : on souhaite représenter une application linéaire, mais définie sur un sous-espace dont la définition repose sur le choix d'un système de coordonnées.

peut être naturel, dans certains contextes, de travailler avec d'autres produits scalaires, et permet de comprendre comment le gradient se voit modifié.

On se place dans $\mathbb{R}^{3N} = \mathbb{R}^3 \times \dots \times \mathbb{R}^3$ pour représenter les vitesses dans l'espace physique de N particules, de masses m_1, m_2, \dots, m_N toutes strictement positives. On considère la fonction qui à un jeu de vitesses associe l'énergie cinétique

$$E(u) = E(u_1, \dots, u_N) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N m_n |u_n|^2.$$

Montrer que E est différentiable, et calculer son gradient pour le produit scalaire canonique, puis pour le produit scalaire $\langle \cdot | \cdot \rangle_m$ pondéré par la collection de masses $m = (m_1, \dots, m_N)$, défini par

$$\langle u | v \rangle_m = \sum_{n=1}^N m_n \langle u_n | v_n \rangle,$$

où $\langle u_n | v_n \rangle$ représente le produit scalaire canonique sur \mathbb{R}^3 .

(Correction page 167)

Définition II.1.17. (Point critique / stationnaire)

Soit f une application continûment différentiable d'un ouvert $U \subset \mathbb{R}^n$ dans \mathbb{R} . On appelle point critique ou point stationnaire tout point $x \in U$ en lequel le gradient s'annule.

Exercice II.1.9. (•) Justifier l'appellation stationnaire dans la définition précédente.

(Correction page 168)

Calcul différentiel

Nous regroupons ici quelques considérations sur la pratique effective du calcul différentiel, et en particulier les notations dx_1 , $dx_1 + dx_2$, etc ...

Si l'on considère par exemple une fonction de \mathbb{R}^2 dans \mathbb{R} , définie par $f(x) = f(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^3 + x_1 x_2$, on écrira

$$df = d(x_1^2 + x_2^3 + x_1 x_2) = 2x_1 dx_1 + 3x_2 dx_2 + x_1 dx_2 + x_2 dx_1 = (2x_1 + x_2) dx_1 + (3x_2 + x_1) dx_2.$$

Dans ce qui précède, dx_1 représente par exemple la différentielle de la fonction $(x_1, x_2) \mapsto x_1$, qui est simplement l'application qui à (h_1, h_2) associe h_1 , qui peut se représenter matriciellement par $[1 \ 0]$. La différentielle de f en (x_1, x_2) est donc représentée dans la base canonique par

$$J(x) = [2x_1 + x_2 \quad 3x_2 + x_1].$$

De façon plus générale, on écrira⁸

$$df(x_1, x_2) = \frac{\partial f}{\partial x_1}(x_1, x_2) dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2}(x_1, x_2) dx_2.$$

On prendra garde au fait que l'expression dx_1 dépend du contexte. La même expression peut correspondre par exemple à une application de \mathbb{R}^3 dans \mathbb{R} , auquel cas dx_1 est représentée matriciellement par $[1 \ 0 \ 0]$.

8. Nous commettons ici un abus de notation courant, auquel il convient de s'habituer car il est très répandu : le ' x_1 ' qui apparaît dans ∂_{x_1} et dans dx_1 représente une variable générique vis à vis de laquelle on dérive, alors que le ' x_1 ' de $df(x_1, x_2)$ est un nombre réel, première coordonnée du point en lequel on dérive la fonction. On devrait en toute rigueur distinguer ces deux acceptions en utilisant des noms différents, par exemple

$$df(a_1, a_2) = \partial_{x_1} f(a_1, a_2) dx_1 + \partial_{x_2} f(a_1, a_2) dx_2.$$

Si l'application est à valeurs vectorielles, par exemple dans \mathbb{R}^2 :

$$f(x_1, x_2) = \begin{bmatrix} x_1^2 + x_2^3 + x_1 x_2 \\ x_1 \end{bmatrix},$$

on écrira de la même manière

$$df(x_1, x_2) = \begin{bmatrix} (2x_1 + x_2) dx_1 + (3x_2 + x_1) dx_2 \\ dx_1 \end{bmatrix},$$

qui peut se représenter matriciellement par

$$J(x_1, x_2) = \begin{bmatrix} 2x_1 + x_2 & 3x_2 + x_1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

de telle sorte que, pour tout h dans \mathbb{R}^2 , on a le développement limité

$$f(x + h) = f(x) + J(x) \cdot h + o(h),$$

où $J(x) \cdot h$ représente le produit matrice vecteur, comme indiqué précédemment.

Exercice II.1.10. Calculer la différentielle de la forme de Minkovski

$$f : (x, y, z, t) \in \mathbb{R}^4 \longmapsto x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2,$$

avec $c > 0$ (vitesse de la lumière).

(Correction page 168)

Récapitulatif

Les développements ci-dessus décrivent des manières variées d'exprimer qu'une fonction peut être approchée localement par une fonction affine. Nous récapitulons ici ces différentes manières, en rappelant leur cadre d'utilisation et les liens entre elles. Dans ce qui suit f désigne, sauf mention contraire, une application de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^m .

Comme on l'a vu, f est dite différentiable en $x \in \mathbb{R}^n$ s'il existe une application $df(x)$ telle que

$$f(x + h) = f(x) + df(x) \cdot h + o(h).$$

Le terme $df(x) \cdot h$ désigne l'image par $df(x)$ du vecteur h . Cette expression est intrinsèque, au sens où elle ne dépend pas du choix d'une base. En pratique, on assimile souvent une application linéaire et son écriture matricielle dans la base canonique, mais il est important de garder en tête la différence entre les deux. Cette approche permet notamment une extension immédiate de la définition en dimension infinie, dans un contexte où les bases sont inutilisables.

Si f est différentiable en x , alors (proposition II.1.7) la différentielle admet une représentation matricielle *dans la base canonique* qui est la matrice jacobienne $J = (\partial_{x_j} f_i)$. On a donc

$$f(x + h) = f(x) + J(x) \cdot h + o(h),$$

où $J(x) \cdot h$ est maintenant un produit matrice-vecteur. L'objet $J(x)$ dépend du choix de la base. L'expression ci-dessus peut être détaillée, de différentes manières. On peut l'écrire composante par composante

$$f_i(x + h) = f_i(x) + \sum_{j=1}^m \partial_{x_j} f_i(x) h_j + o(h),$$

ou de façon globale, avec e_i le i -ème vecteur de la base canonique de \mathbb{R}^m :

$$f(x + h) = f(x) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \partial_{x_j} f_i(x) h_j e_i + o(h),$$

Comme il a été précisé, l'existence de dérivées partielles en un point ne garantit pas la différentiabilité. En revanche (proposition II.1.8), si les dérivées partielles sont définies et continues sur un ouvert, alors la fonction est continûment différentiable sur cet ouvert.

Lorsque la fonction est à valeurs dans \mathbb{R} (cas $m = 1$), la matrice jacobienne est une matrice ligne, et l'application différentielle $df(x)$ est une forme linéaire. On peut alors écrire $df(x) \cdot h$ sous la forme d'un produit scalaire $\langle g | h \rangle$, où g est appelé *gradient* de f au point x , et noté $\nabla f(x)$. On a alors le développement

$$f(x + h) = f(x) + \langle \nabla f(x) | h \rangle + o(h).$$

Le vecteur $\nabla f(x)$ dépend du produit scalaire choisi. Lorsque ce choix n'est pas précisé, il s'agit du gradient associé au produit scalaire canonique sur l'espace euclidien \mathbb{R}^n . Lorsque l'on se place dans la base canonique de \mathbb{R}^n , que l'on considère muni du produit scalaire canonique, le vecteur $\nabla f(x)$ est représenté dans la base canonique par la matrice-ligne $J(x)$:

$$\nabla f(x) = (\partial_{x_1} f, \partial_{x_2} f, \dots, \partial_{x_n} f).$$

II.1.3 Théorème fondamental de l'analyse

Le théorème fondamental de l'analyse peut prendre plusieurs formes selon le sens que l'on donne à la notion d'intégrale. Le chapitre sur l'intégrale de Lebesgue montre que l'on peut définir cette intégrale pour des classes très générales de fonctions. Nous nous en limiterons ici à une définition plus classique de l'intégrale, en nous limitant à des fonctions continûment différentiables, de telle sorte que l'on n'aura besoin d'intégrer que des fonctions continues. On pourra donc s'en tenir à la notion d'intégrale de Riemann. L'objet de cette section est de généraliser au cas vectoriel la propriété portant sur les fonctions de \mathbb{R} dans \mathbb{R}^m : pour toute fonction f continûment dérivable sur $]a, b[$, à valeurs dans \mathbb{R}^m , pour tout x dans $]a, b[$, tout h tel que $x + h \in]a, b[$, on a

$$f(x + h) = f(x) + \int_x^{x+h} f'(s) ds.$$

Cette intégrale peut s'écrire différemment en introduisant la fonction $t \in [0, 1] \mapsto f(x + th)$, donc la dérivée en t est $f'(x + th)h$. On a

$$f(x + h) = f(x) + \int_0^1 f'(x + th)h dt.$$

Le théorème suivant généralise cette propriété aux fonctions de plusieurs variables.

Théorème II.1.18. Soit f une application définie d'un ouvert $U \subset \mathbb{R}^n$ dans \mathbb{R}^m , continûment différentiable sur U , et h tel que le segment

$$[x, x + h] = \{x + \theta h, \theta \in [0, 1]\}$$

soit inclus dans U . On a alors

$$f(x + h) = f(x) + \int_0^1 df(x + th) \cdot h dt.$$

Démonstration. On introduit l'application Φ de $[0, 1]$ dans \mathbb{R}^m , définie par

$$\Phi : t \in [0, 1] \mapsto \Phi(t) = f(x + th).$$

D'après la proposition II.1.9, cette application est continûment différentiable (on dira plus simplement *dérivable*, puisqu'il s'agit d'une fonction de \mathbb{R} dans \mathbb{R}^m), de dérivée

$$\Phi'(t) = df(x + th) \cdot h.$$

On a donc

$$f(x+h) - f(x) = \Phi(1) - \Phi(0) = \int_0^1 \Phi'(t) dt = \int_0^1 df(x+th) \cdot h dt,$$

qui est l'identité annoncée. \square

Ce théorème nous conduit naturellement au théorème des accroissements finis pour les fonctions de plusieurs variables, qui exprime un principe simple que l'on retrouve dans différents contextes⁹ : si l'on contrôle les variations d'une certaine quantité le long d'un chemin de longueur finie qui va de x vers $x+h$, alors on peut contrôler la différence des valeurs entre $x+h$ et x .

Théorème II.1.19. (des accroissements finis)

Soit f une application définie d'un ouvert $U \subset \mathbb{R}^n$ dans \mathbb{R}^m , continûment différentiable sur U , et h tel que le segment

$$[x, x+h] = \{x + \theta h, \theta \in [0, 1]\}$$

soit inclus dans U . Alors

$$\|f(x+h) - f(x)\| \leq \max_{t \in [0,1]} \|df(x+th)\| \|h\|,$$

où $\|df(x+th)\|$ est la norme de l'application linéaire $df(x+th)$ de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^m (norme subordonnée à la norme euclidienne, selon la définition I.9.3, page 22).

Démonstration. Notons en premier lieu que, la différentielle df étant continue sur le compact $[x, x+h]$, elle est bien bornée et atteint ses bornes, en particulier le max ci-dessus est bien défini comme un réel positif. On prend la norme de l'identité établie dans le théorème précédent : On a alors

$$\begin{aligned} \|f(x+h) - f(x)\| &= \left\| \int_0^1 df(x+th) \cdot h dt \right\| \leq \int_0^1 \|df(x+th) \cdot h\| dt \\ &\leq \int_0^1 \|df(x+th)\| \|h\| dt \leq \max_{t \in [0,1]} \|df(x+th)\| \|h\|, \end{aligned}$$

qui est bien l'inégalité annoncée. \square

Exercice II.1.11. L'inégalité établie précédemment est-elle valide si l'on munit \mathbb{R}^n et \mathbb{R}^m d'autres normes que la norme euclidienne ? (Correction page 168)

Exercice II.1.12. Soit f une application continûment différentiable sur un ouvert U , et $K \subset U$ un compact convexe. Montrer que f est Lipchitzienne sur K . (Correction page 168)

II.2 Exercices

Exercice II.2.1. Soit f la fonction de \mathbb{R}^2 dans \mathbb{R} définie par

$$f(x_1, x_2) = \max(x_1, x_2).$$

a) Montrer que f est continue sur \mathbb{R}^2 .

b) Montrer que f est continûment différentiable sur

$$\{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2, x_1 \neq x_2\},$$

9. On pourra penser à une version *Tour de France* de cette propriété très générale : si un coureur cycliste effectue un parcours de 10 km sur une route dont la pente n'excède pas 7%, il sait qu'il n'aura pas monté en altitude de plus de $10 \text{ km} \times 0.07 = 700 \text{ m}$.

et préciser sa différentielle et son gradient sur chaque composante de cet ensemble (de part et d'autre de la diagonale).

c) Montrer que f n'est pas différentiable sur $\{(x, x), x \in \mathbb{R}\}$. (Correction page 168)

Exercice II.2.2. (••) Soit $A \in \mathcal{M}(\mathbb{R}^{n \times n})$ une matrice carrée.

a) Montrer que la fonction

$$f : x \mapsto f(x) = \frac{1}{2} \langle Ax | x \rangle - \langle b | x \rangle \in \mathbb{R}, \quad b \in \mathbb{R}^n,$$

est différentiable, et préciser son gradient.

b) Quelle forme prend ce gradient si A est symétrique ?

c) Quels sont les points stationnaires de f ? (Correction page 169)

Exercice II.2.3. (Vecteur gaussien)

Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ une matrice carrée, que l'on suppose *symétrique définie positive*, c'est-à-dire que $A^T = A$, et $\langle Ax | x \rangle > 0$ pour tout $x \neq 0$. On s'intéresse à la fonction qui représente (à constante de normalisation près) la loi d'un vecteur gaussien centré en a dans \mathbb{R}^n :

$$f(x) = \exp \left(-\frac{1}{2} \langle A \cdot (x - a) | x - a \rangle \right).$$

a) Montrer que f est différentiable, et donner l'expression de son gradient.

b) Quels sont les points stationnaires de f ? (Correction page 169)

Exercice II.2.4. (••) On se place sur \mathbb{R}^2 muni de la distance euclidienne. Pour un ensemble donné du plan $A \subset \mathbb{R}^2$, on considère la fonction définie par $f(x) = d(x, A)$ (distance du point x à l'ensemble A).

a) Préciser les zones de différentiabilité de f lorsque A est (i) un singleton, (ii) une paire de points distincts, (iii) un cercle, (iv) un disque, (v) un rectangle, (vi) une forme "quelconque"...

b)(*) On associe à chaque grande ville de France (pour fixer les idées on pourra imaginer les 20 plus grandes villes par exemple) un point (son barycentre), et l'on appelle A l'ensemble de ces points. Que peut-on dire des points de non différentiabilité de la fonction f définie ci-dessus ? (Correction page 169)

Exercice II.2.5. La figure II.2.1 représente les isovaleurs de la fonction altitude pour une certaine zone géographique, que l'on peut considérer comme une fonction de \mathbb{R}^2 dans \mathbb{R} .

a) Localiser des points critiques de cette fonction f (c'est à dire le point en lesquels le gradient s'annule), et décrire la forme de la fonction f au voisinage de ces points. Proposer des fonctions polynomiales qui vous paraissent de nature à reproduire la forme de la fonction au voisinage du point critique, dans les différents cas.

b) (*) Comment caractériser les zones correspondant aux lacs ?

c) (*) Comment peut-on caractériser le bassin d'attraction d'un lac, c'est à dire l'ensemble des x tels qu'une goutte d'eau tombée en x va alimenter le lac en question ?

d) (*) Le nombre de lacs peut-il augmenter ou diminuer en fonction de la pluviométrie ? (Correction page 170)

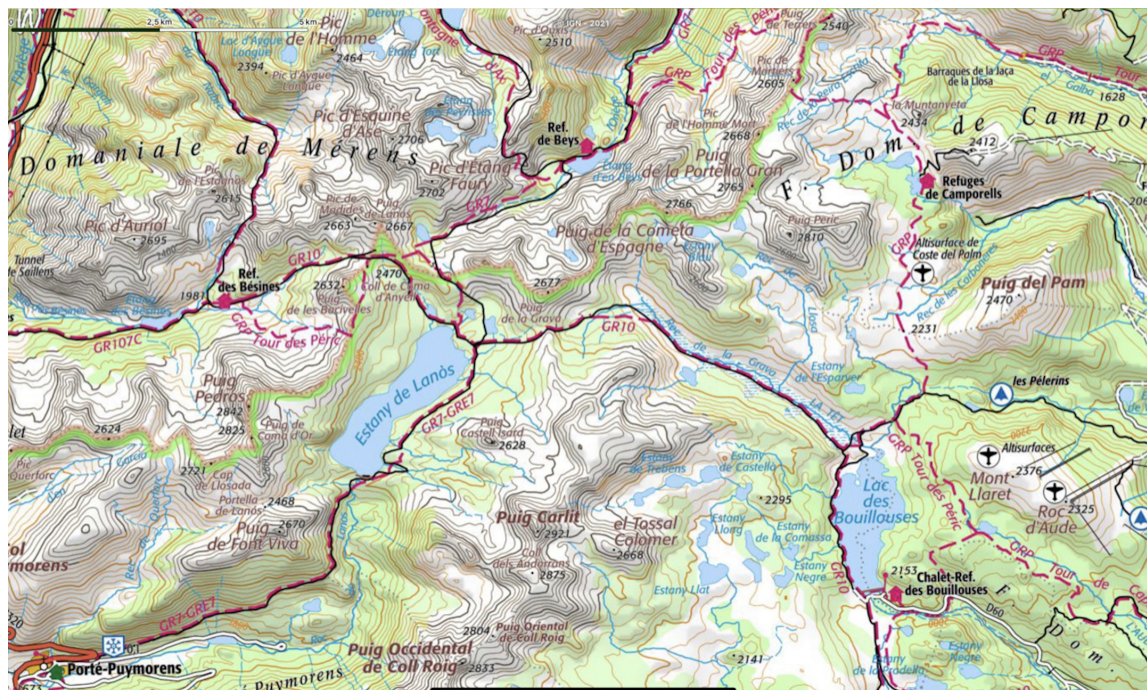


FIGURE II.2.1 – Isovaleurs de l'altitude sur une zone des Pyrénées

(Correction page 169)

Exercice II.2.6. (Taux de déformation (••))

On considère un champ de vitesse (on pourra penser à la vitesse instantanée d'un fluide)

$$x = (x_1, x_2, x_3) \mapsto u(x) = (u_1(x), u_2(x), u_3(x)).$$

On suppose u différentiable en un point x d'un ouvert U de \mathbb{R}^3 .

a) Montrer que l'on peut écrire le champ de vitesse au point $x + h$ voisin de x de la façon suivante

$$u(x + h) = u(x) + \omega \wedge h + D \cdot h + o(h), \quad (\text{II.2.1})$$

où ω est un vecteur de \mathbb{R}^3 , et $D \in \mathcal{M}_3(\mathbb{R})$ une matrice symétrique.

b) Justifier l'appellation *matrice des taux de déformation* utilisée pour désigner la matrice D .

c)(★) On dit qu'un écoulement est incompressible si $\partial_1 u_1 + \partial_2 u_2 + \partial_3 u_3 = 0$ (i.e. si ce qu'on appelle la *divergence* de u est nulle). Montrer que si l'écoulement est incompressible sur U , alors la somme des valeurs propres de la matrice D associée à tout point de U est égale à 0, et interprétez physiquement cette propriété.

d) Donner un exemple de champ de vitesses u non trivial défini sur \mathbb{R} tel qu'en tout point, la décomposition (II.2.1) soit telle que $D = 0$. (On pourra pour simplifier chercher un champ qui soit invariant par translation dans la direction verticale, de façon à se ramener à un champ bidimensionnel).

e) Donner un exemple de champ de vitesses u non trivial défini sur \mathbb{R} tel qu'en tout point, la décomposition (II.2.1) soit telle que $\omega = 0$ (champ irrotationnel).

f) (★) Que peut-on dire, au vu de ce qui précède, d'un champ qui dérive d'un potentiel, c'est-à-dire un champ qui s'écrit $u = -\nabla \Phi$, où Φ est une fonction scalaire suffisamment régulière pour que u soit différentiable?

(Correction page 170)

Exercice II.2.7. (Potentiel d'interaction (•••))

On considère la fonction $D(\cdot)$ qui à $q = (q_1, q_2) \in \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3$ (attention, q_1 et q_2 désignent ici des points de \mathbb{R}^3) associe la distance entre les points q_1 et q_2 de \mathbb{R}^3 :

$$D(q) = D(q_1, q_2) = \|q_2 - q_1\|.$$

a) Montrer que $D(\cdot)$ est différentiable sur l'ouvert

$$U = \{ q = (q_1, q_2) \in \mathbb{R}^6, q_1 \neq q_2 \},$$

et exprimer son gradient (on pourra exprimer les gradients partiels ∇_{q_1} et ∇_{q_2}) en fonction du vecteur unitaire $e_{12} = (q_2 - q_1) / \|q_2 - q_1\|$.

b) On introduit un potentiel d'interaction sur le système de deux particules localisées en q_1 et q_2 sous la forme $V = V(q) = V(q_1, q_2) = \varphi(D(q_1, q_2))$, où φ est une fonction continûment dérivable de \mathbb{R}_+ dans \mathbb{R} . Montrer que V est différentiable sur U , et écrire son gradient.

c) Préciser les gradients partiels $\nabla_{q_1} V$ et $\nabla_{q_2} V$ si l'on prend pour φ le potentiel d'interaction gravitationnelle défini par $\varphi(D) = -1/D$.

d) On se replace dans le cas général d'un potentiel φ quelconque, et l'on considère maintenant un système de N particules dans \mathbb{R}^3 . On définit un potentiel d'interaction global de la façon suivante

$$V(q) = V(q_1, q_2, \dots, q_N) = \sum_{1 \leq i < j \leq N} \varphi(D(q_i, q_j)).$$

On s'intéresse au système résultant du principe fondamental de la dynamique, sous l'hypothèse de forces dérivant d'un potentiel (on prend des masses unitaires), c'est-à-dire

$$\frac{d^2 q}{dt^2} = -\nabla V(q). \quad (\text{II.2.2})$$

Écrire l'équation qui résulte de ce principe pour chacune des particules, qui s'écrit de façon abstraite

$$\frac{d^2 q_i}{dt^2} = -\nabla_{q_i} V(q).$$

e)(★) On se place dans le cadre des notations de la question précédente. On suppose que l'on connaît une solution $t \in [0, T[\mapsto q(t) \in U$ de l'équation d'évolution (II.2.2). Montrer que l'on a conservation de l'énergie totale, c'est à dire que la quantité

$$E(t) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \left\| \frac{dq_i}{dt}(t) \right\|^2 + V(q(t))$$

est constante sur $[0, T[$.

Dans le cas du potentiel gravitationnel $\varphi(D) = -1/D$, peut-on en déduire que les vitesses sont majorées sur $[0, T[$? Même question pour le cas du potentiel coulombien entre charges identiques $\varphi(D) = 1/D$.

(Correction page 171)

II.3 Théorèmes des fonctions implicites et d'inversion locale

Le résultat principal de cette section est le théorème dit *des fonctions implicites*, que l'on peut interpréter comme suit. On considère une équation portant sur $y \in \mathbb{R}^m$, équation qui dépend de paramètres x_1, \dots, x_n , et que l'on écrit

$$f(x, y) = 0.$$

Cette équation est à valeurs vectorielles. Pour se placer dans un contexte où l'équation, pour un jeu de paramètres x fixé, peut permettre de déterminer y , on s'intéresse au cas où il y a autant d'équations que d'inconnues, c'est à dire que f est à valeurs dans \mathbb{R}^m . L'inconnue y est donc définie de façon *implicite* par rapport aux paramètres x_1, \dots, x_n . On se place au voisinage d'une solution de cette équation : pour un jeu de paramètres $x = (x_1, \dots, x_n)$ donné, on suppose connue une solution $y = (y_1, \dots, y_m)$ de l'équation. Si l'on fait varier les paramètres de l'équation, on peut s'attendre à ce que, sous certaines conditions, la solution en y varie elle-même de façon régulière. Le théorème ci-dessous donne des conditions suffisantes pour que l'on puisse en effet exprimer y en fonction de x , de façon régulière, au voisinage d'un couple paramètres - solution (x_0, y_0) donné. La condition principale permettant cette explicitation de la dépendance apparaît clairement dans l'exemple-jouet suivant :

$$f : (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mapsto ax + by + c.$$

On peut exprimer y fonction de x si et seulement si $b \neq 0$, où b quantifie la manière dont f varie vis-à-vis de y . Dans le cas le plus général ($y \in \mathbb{R}^m$, f à valeurs dans \mathbb{R}^m), cette dépendance sera encodée par la différentielle de f par rapport à y (qui est bien représentée dans la base canonique par une matrice carrée). L'hypothèse principale porte sur le caractère *inversible* de cette différentielle.

Théorème II.3.1. Soit f une fonction définie sur un ouvert W de $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$, à valeurs dans \mathbb{R}^m . On suppose f continûment différentiable sur W , et l'on suppose que la différentielle partielle de f par rapport à y , notée $\partial_y f(x, y)$, est inversible en tout point¹⁰ de W . On considère un point $(x_0, y_0) \in W$ qui annule f :

$$f(x_0, y_0) = 0.$$

On peut alors exprimer y comme fonction de x au voisinage de (x_0, y_0) . Plus précisément : il existe des voisinages ouverts $U \subset \mathbb{R}^n$ et $V \subset \mathbb{R}^m$ de x_0 et y_0 , respectivement, et une fonction Ψ de U dans V , tels que

$$(x, y) \in U \times V, f(x, y) = 0 \iff y = \Psi(x).$$

La fonction Ψ est continûment différentiable sur U , et sa différentielle s'exprime

$$d\Psi(x) = -(\partial_y f(x, y))^{-1} \circ \partial_x f(x, y), \text{ avec } y = \Psi(x).$$

Démonstration. La démarche, de nature constructive, est basée sur un processus itératif construit selon les principes suivants. On considère x proche de x_0 (dans un sens précisé plus loin), et l'on cherche y tel que $f(x, y) = 0$. On suppose que l'on dispose d'une première approximation y_k du y recherché, et on cherche un y_{k+1} qui en soit une meilleure approximation. On a

$$f(x, y_{k+1}) = f(x, y_k + (y_{k+1} - y_k)) \approx f(x, y_k) + \partial_y f(x, y_k) \cdot (y_{k+1} - y_k).$$

On souhaite annuler cette quantité, ce qui suggère de définir y_{k+1} comme

$$y_{k+1} = y_k - (\partial_y f(x, y_k))^{-1} \cdot f(x, y_k).$$

Il s'agit de la méthode dite de *Newton* pour trouver le zéro d'une fonction. Nous allons considérer ici une version modifiée de cette méthode, en remplaçant la différentielle partielle en y par sa valeur au point (x_0, y_0) . Partant de y_0 (en fait, on peut partir d'une valeur initiale différente de y_0 , mais nous

¹⁰. Comme précisé dans la remarque II.3.3 ci-après, il suffit de vérifier que la différentielle soit inversible en (x_0, y_0) pour qu'elle le soit dans un voisinage de ce point.

le fixons comme point de départ pour simplifier), on construit donc la suite (y_k) par récurrence, selon la formule

$$y_{k+1} = y_k - Q^{-1} \cdot f(x, y_k), \text{ avec } Q = \partial_y f(x_0, y_0).$$

N.B. : On prendra garde au fait que, pour (x, y) donné, $\partial_y f(x, y)$ est une application linéaire de \mathbb{R}^m dans \mathbb{R}^m . Cette application dépend du point $(x, y) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$ où elle est prise, mais sans que la différentielle soit prise par rapport à la variable x . Cette différentielle partielle est définie par le développement limité suivant, où l'on ne perturbe que la variable y : pour $h \in \mathbb{R}^m$,

$$f(x, y + h) = f(x, y) + \partial_y f(x, y) \cdot h + o(h).$$

Il s'agit donc d'un champ d'applications linéaires, auquel on peut associer un champ de matrices carrées $m \times m$ (leurs représentations dans la base canonique de \mathbb{R}^m), qui vit sur un espace de dimension $n \times m$. L'application Q est simplement la valeur particulière de ce champ au point (x_0, y_0) .

Cette récurrence peut s'écrire $y_{k+1} = \Phi_x(y_k)$, où la fonction Φ_x est définie par

$$y \mapsto \Phi_x(y) = y - Q^{-1} \cdot f(x, y),$$

pour tout y tel que $(x, y) \in W$. Noter que y est point fixe de Φ_x si et seulement si $f(x, y) = 0$. Nous allons montrer que cette fonction admet bien un unique point fixe sur un voisinage de y_0 . Cette fonction est différentiable sur son domaine de définition, de différentielle

$$d\Phi_x(y) = I - Q^{-1} \circ \partial_y f(x, y).$$

En écrivant $I = Q^{-1}Q$ on obtient

$$\|d\Phi_x(y)\| = \|Q^{-1}(\partial_y f(x_0, y_0) - \partial_y f(x, y))\| \leq \|Q^{-1}\| \|\partial_y f(x_0, y_0) - \partial_y f(x, y)\|$$

Fixons $\kappa = 1/2$. La différentielle étant continue, il existe un $r > 0$ tel que, pour tout point $x \in \overline{B}(x_0, r)$, tout $y \in \overline{B}(y_0, r)$ (on prend r suffisamment petit pour que $\overline{B}(x_0, r) \times \overline{B}(y_0, r) \subset W$),

$$\|\partial_y f(x_0, y_0) - \partial_y f(x, y)\| \leq \kappa \|Q^{-1}\|^{-1},$$

de telle sorte que

$$\forall x \in \overline{B}(x_0, r), y \in \overline{B}(y_0, r), \|d\Phi_x(y)\| \leq \kappa.$$

On a donc, pour tous y, y' dans $\overline{B}(y_0, r)$,

$$\|\Phi_x(y) - \Phi_x(y')\| \leq \kappa \|y - y'\|$$

d'après le théorème des accroissements finis (théorème II.1.19, page 42), avec $\kappa = 1/2$. L'application Φ_x est donc contractante sur $\overline{B}(y_0, r)$. Montrons qu'elle laisse stable une boule autour de y_0 . Comme l'application

$$x \mapsto \Phi_x(y_0) = y_0 - Q^{-1} \cdot f(x, y_0)$$

est continue en x_0 , il existe un $r' < r$ tel que, pour tout $x \in \overline{B}(x_0, r')$, on ait

$$\|\Phi_x(y_0) - \Phi_{x_0}(y_0)\| \leq (1 - \kappa)r,$$

avec $\Phi_{x_0}(y_0) = y_0$ car $f(x_0, y_0) = 0$. On a alors, pour tout $x \in \overline{B}(x_0, r')$, tout $y \in \overline{B}(y_0, r)$,

$$\|\Phi_x(y) - y_0\| = \|\Phi_x(y) - \Phi_{x_0}(y_0)\| \leq \underbrace{\|\Phi_x(y) - \Phi_x(y_0)\|}_{\leq \kappa \|y - y_0\|} + \underbrace{\|\Phi_x(y_0) - y_0\|}_{\leq (1 - \kappa)r} \leq \kappa r + (1 - \kappa)r = r.$$

Pour tout $x \in \overline{B}(x_0, r')$, l'application Φ_x est donc bien définie de $\overline{B}(y_0, r)$ dans lui-même, et cet ensemble est complet comme fermé dans le complet \mathbb{R}^m . Elle par ailleurs contractante comme montré précédemment. D'après le théorème I.8.2, elle admet donc un unique point fixe sur $\overline{B}(y_0, r)$, c'est-à-dire qu'il existe un unique $y \in \overline{B}(y_0, r)$ tel que $f(x, y) = 0$. On note Ψ l'application qui à x associe cette unique solution en y de $f(x, y) = 0$.

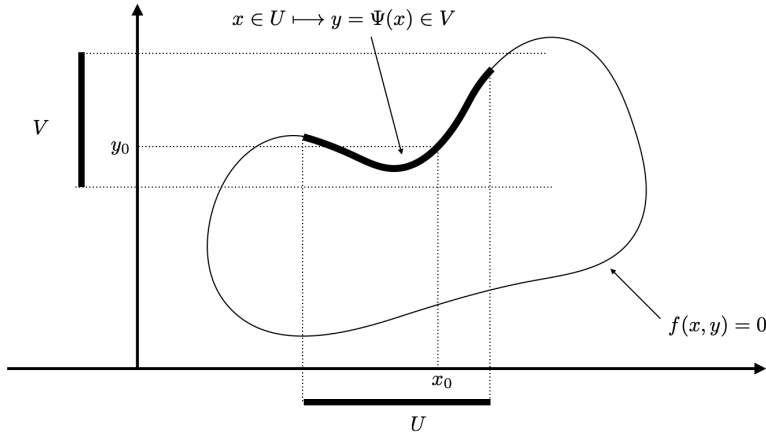


FIGURE II.3.1 – Théorème des fonctions implicites

Montrons maintenant la continuité de Ψ , et précisons le choix des voisinages U et V . Soient x_1 et x_2 deux points de $\overline{B}(x_0, r')$, et $y_1 = \Psi(x_1)$, $y_2 = \Psi(x_1)$. On a

$$\|y_2 - y_1\| = \|\Phi_{x_2}(y_2) - \Phi_{x_1}(y_1)\| \leq \|\Phi_{x_2}(y_2) - \Phi_{x_2}(y_1)\| + \|\Phi_{x_2}(y_1) - \Phi_{x_1}(y_1)\|.$$

Comme Φ_{x_2} est κ -contractante sur $\overline{B}(y_0, r)$, on a $\|\Phi_{x_2}(y_2) - \Phi_{x_2}(y_1)\| \leq \kappa \|y_2 - y_1\|$, d'où

$$\begin{aligned} \|y_2 - y_1\| &\leq \frac{1}{1 - \kappa} \|\Phi_{x_2}(y_1) - \Phi_{x_1}(y_1)\| = \frac{1}{1 - \kappa} \|Q^{-1} \cdot (f(x_2, y_1) - f(x_1, y_1))\| \\ &\leq \frac{1}{1 - \kappa} \|Q^{-1}\| \max_{\overline{B}(x_0, r') \times \overline{B}(y_0, r)} \|\partial_x f\| \|x_2 - x_1\| \end{aligned}$$

d'après le théorème des accroissements finis II.1.19 (f étant continûment différentiable sur le compact $\overline{B}(x_0, r') \times \overline{B}(y_0, r)$, sa différentielle partielle par rapport à x est bornée). Cette quantité tend en particulier vers 0 quand x_2 tend vers x_1 . L'application Ψ est donc continue sur $\overline{B}(x_0, r')$ à valeurs dans $\overline{B}(y_0, r)$, et même lipschitzienne : il existe $C > 0$ tel que

$$\|\Psi(x_2) - \Psi(x_1)\| \leq C \|x_2 - x_1\|.$$

Soit V voisinage ouvert de y_0 inclus dans $\overline{B}(y_0, r)$. Comme Ψ est continue, il existe un voisinage ouvert de x_0 , $U \subset \overline{B}(x_0, r')$, tel que $\Psi(U) \subset V$.

Il reste à montrer que Ψ est différentiable sur U . Soit $x \in U$, $y = \Psi(x) \in V$. On considère une variation h de x telle que $x + h \in U$. Il existe un unique g tel que $y + g \in V$ vérifie

$$f(x + h, y + g) = 0.$$

D'après ce qui précède il existe $C > 0$ tel que $\|g\| \leq C \|h\|$. La différentiabilité de f en (x, y) s'exprime

$$\underbrace{f(x + h, y + g)}_{=0} = \underbrace{f(x, y)}_{=0} + \partial_x f(x, y) \cdot h + \partial_y f(x, y) \cdot g + o(h, g).$$

On a donc

$$g = - \left((\partial_y f(x, y))^{-1} \circ \partial_x f(x, y) \right) \cdot h + o(h),$$

(le $o(h, g)$ s'est bien transformé en $o(h)$ du fait que la norme de h domine celle de g , comme indiqué précédemment). Ce g est, par construction, $\Psi(x + h) - \Psi(x)$, on a donc

$$\Psi(x + h) = \Psi(x) - \left((\partial_y f(x, y))^{-1} \circ \partial_x f(x, y) \right) \cdot h + o(h).$$

ce qui exprime que l'application $x \mapsto \Psi(x)$ est différentiable sur U , de différentielle

$$d\Psi(x) = (\partial_y f(x, \Psi(x)))^{-1} \circ \partial_x f(x, \Psi(x)).$$

Comme f est continûment différentiable, et que Ψ est continue, $x \mapsto d\Psi(x)$ est continue. \square

Remarque II.3.2. On notera que, par construction, Ψ est bien définie sur tout U mais, comme illustré par la figure II.3.1, elle n'est pas nécessairement surjective (cette remarque sera importante pour la démonstration du théorème des fonctions implicites, dans lequel il s'agira de construire deux ouverts en bijection). Par ailleurs, pour $x \in U$, il peut exister plusieurs y tels que $(f(x, y) = 0)$, mais un seul qui soit dans V .

Remarque II.3.3. Pour vérifier l'applicabilité du théorème précédent en un point (x_0, y_0) qui annule f , et au voisinage duquel f est définie, il suffit de vérifier que la différentielle de f par rapport à y est inversible en (x_0, y_0) . En effet, si c'est le cas, l'application $(x, y) \mapsto \partial_y f(x, y)$ étant continue, et le déterminant étant une fonction continue, la différentielle reste inversible sur un ouvert de (x_0, y_0) , qui peut jouer le rôle du W dans les hypothèses du théorème précédent. On dira que le théorème des fonctions implicites s'applique *en* (x_0, y_0) , ou *au voisinage de* (x_0, y_0) .

Remarque II.3.4. Ce théorème, qui peut sembler assez abstrait et technique, peut être invoqué d'une manière *négative* pour qualifier la pertinence d'un modèle. Replaçons-nous dans le cadre de l'introduction, en interprétant $f(x, y)$ comme un *modèle* portant sur y , sous la forme d'un système d'équations dépendant de paramètres x_1, \dots, x_n . Le modèle a vocation à, pour un jeu de paramètres (qui peuvent être des températures, des pressions, des flux d'information, des prix, ...), déterminer la collection des inconnues y_1, \dots, y_m . Dans le cadre d'une utilisation de ce modèle dans la vie réelle, les paramètres ne sont en général connus qu'approximativement (erreurs de mesure, variabilité en temps de paramètres supposés statiques, ...). Si la solution y ne dépend *pas* de façon régulière des paramètres, cela signifie qu'une erreur petite sur les paramètres peut induire une variation très importante de la solution. On dira que le problème n'est pas *stable*¹¹. Du fait de la non-différentiabilité de la correspondance paramètres \mapsto solution (même si le problème est bien posé au sens où la solution est définie de façon unique), il n'existera pas de constante c telle qu'une erreur relative ε sur les paramètres induise une erreur contrôlée par $c\varepsilon$. Un tel modèle est essentiellement *inutilisable* en situation réelle, ou tout du moins très délicat à exploiter.

Remarque II.3.5. (Sensibilité vis à vis des paramètres)

Dans la continuité de la remarque précédente, mais de façon plus positive, lorsque l'on est bien dans le cadre du théorème des fonctions implicites, la différentielle de Ψ précise la dépendance de la solution vis-à-vis des paramètres. On écrira en général simplement $\Psi(x) = y(x)$, de telle sorte que la matrice jacobienne de Ψ contient les dérivées partielles $\partial y_i / \partial x_j$ (où y est maintenant considéré comme fonction de x), c'est-à-dire l'expression de la dépendance de la i -ième composante de y vis-à-vis du paramètre x_j (on parlera de *sensibilité*). Les paramètres les plus significatifs pour une composante y_i correspondent aux fortes valeurs de la dérivée, il sera important de bien maîtriser la valeur, alors que les paramètres pour lesquels $\partial y_i / \partial x_j$ est petit pour tous les i peuvent être a priori estimés avec une précision médiocre, sans que cela n'influe de façon préjudiciable sur la solution.

Remarque II.3.6. (Identification de paramètres)

Il est courant de s'intéresser au *problème inverse*, qui peut se formuler comme suit. On fait confiance au modèle $f(x, y) = 0$, on dispose de mesures pour la solution y , et l'on cherche à *estimer les paramètres* correspondant à la solution mesurée. On est donc amené à considérer le problème dans l'autre sens, c'est-à-dire que l'on cherche à estimer x à partir de la connaissance de y . On ne peut espérer retrouver exactement les paramètres que si leur nombre est égal à celui des inconnues $n = m$. On notera que, pour ce nouveau problème, les paramètres les plus difficiles à identifier précisément sont ceux qui ont peu

¹¹. On parle parfois de stabilité au sens de Hadamard, même si cette appellation fait plutôt référence à une dépendance *continue* de la solution par rapport aux données.

d'influence sur la solution, qui étaient considérés pour le problème direct comme peu significatifs, dont la connaissance précise n'était pas nécessaire. C'est précisément leur peu d'influence sur la solution qui rend difficile leur estimation à partir de la connaissance de cette solution ¹².

Définition II.3.7. Soit φ une application d'un ouvert $U \subset \mathbb{R}^n$ dans un ouvert $V = \varphi(U)$ dans \mathbb{R}^n . On dit que φ est un C^1 – difféomorphisme de U vers V si φ est bijective, et si φ et sa réciproque φ^{-1} sont continûment différentiables.

Proposition II.3.8. On se place dans les hypothèses de la définition précédente. La différentielle de φ est inversible en tout point de U , et son inverse est la différentielle de l'application réciproque φ^{-1} : pour tout $x \in U$, $y = \varphi(x) \in V$,

$$d\varphi^{-1}(y) = (d\varphi(x))^{-1}.$$

Démonstration. On a, pour tout $y \in V$,

$$\varphi \circ \varphi^{-1}(y) = y.$$

La règle de différentiation en chaîne implique donc (avec $x = \varphi^{-1}(y)$)

$$d\varphi(x) \circ d\varphi^{-1}(y) = \text{Id},$$

qui conclut la preuve. \square

Théorème II.3.9. (Inversion locale)

Soit φ une application continûment différentiable d'un ouvert $W \subset \mathbb{R}^n$ dans \mathbb{R}^n . On suppose que $d\varphi(x)$ est inversible pour tout $x \in W$. Alors φ est un C^1 – difféomorphisme local : pour tout $x_0 \in W$, il existe un voisinage ouvert $U \subset W$ de x_0 et un voisinage ouvert V de $y_0 = \varphi(x_0)$ tel que $\varphi|_U$ soit un C^1 – difféomorphisme de U vers V .

Démonstration. On considère l'application (noter que l'on écrit (y, x) du fait qu'il va s'agir, contrairement à l'usage, d'exprimer x en fonction de y) :

$$g : (y, x) \in \mathbb{R}^n \times W \longmapsto g(y, x) = \varphi(x) - y.$$

Cette application est différentiable sur $\mathbb{R}^n \times W$, de différentielle partielle par rapport à x

$$\partial_x g(y, x) = d\varphi(x).$$

Cette différentielle est inversible sur W par hypothèse. Soit $x_0 \in W$, et $y_0 = \varphi(x_0)$, d'où $g(y_0, x_0) = 0$. D'après le théorème des fonctions implicites, il existe un voisinage V de y_0 , un voisinage $\tilde{U} \subset W$ de x_0 , et Ψ une application continûment différentiable de V dans \tilde{U} , tels que

$$(y, x) \in V \times \tilde{U}, \quad g(y, x) = 0, \quad \text{i.e.} \quad y = \varphi(x) \iff x = \Psi(y).$$

L'application Ψ est donc la réciproque de φ . Il reste à préciser les voisinages ouverts de x_0 et y_0 qui sont en bijection. Il faut prendre garde à une difficulté (annoncée dans la remarque II.3.2) : Ψ , qui est bien définie sur tout V , (cet ouvert V est noté U dans le théorème des fonctions implicites, du fait du renversement des rôles de x et y que nous avons effectué ici), n'est pas nécessairement *surjective* de V dans \tilde{U} . Pour garantir que les deux ouverts soient en bijection, on réduit l'ouvert \tilde{U} en introduisant

$$U = \tilde{U} \cap \Psi(V).$$

Comme, pour tout $y \in V$, l'équation $y = \varphi(x)$ n'a qu'une solution en $x \in \tilde{U}$, cet ensemble s'écrit aussi $U = \tilde{U} \cap \varphi^{-1}(V)$. Il s'agit donc bien d'un ouvert par continuité de V . \square

¹². Nous nous en tenons dans cette remarque à une vision un peu simpliste des choses, comme s'il était possible de séparer à la fois les paramètres et les composantes de la solution (ça n'est possible que si la différentielle est diagonale). En tout généralité, les études de sensibilité évoquées dans ces remarques passent par une étude plus complète de la matrice dans sa globalité, qui passe en particulier par une analyse spectrale.

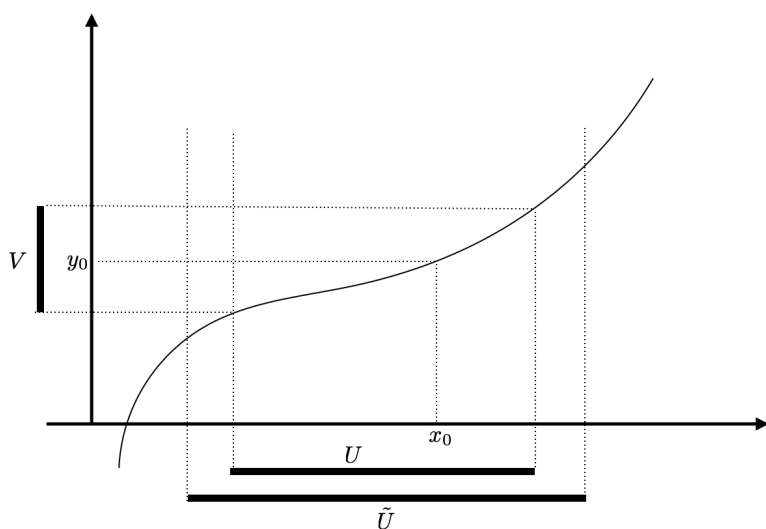


FIGURE II.3.2 – Théorème d'inversion locale

II.4 Exercices

Exercice II.4.1. Soit f une fonction continûment différentiable sur $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$, à valeurs dans \mathbb{R}^m .

Montrer que l'ensemble $F = \{(x, y), f(x, y) = 0\}$ est un fermé de $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$, et que l'ensemble des (x_0, y_0) au voisinage desquels on peut appliquer le théorème des fonctions implicites est un ouvert du fermé F (pour la topologie induite, dont les ouverts sont les intersections d'ouverts de $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$ avec F). (Correction page 172)

Exercice II.4.2. Identifier dans les cas suivantes l'ensemble F des solutions de $f(x, y) = 0$, ainsi que l'ensemble des points (x, y) au voisinage desquels on peut appliquer le théorème des fonctions implicites. Préciser, pour les points en lesquels les hypothèses ne sont pas vérifiées, si intervertir les rôles de x et y permet de les vérifier.

a) $f(x, y) = x^2 + y^2 - r^2$.

b) $f(x, y) = y - x^2$.

c) $f(x, y) = (y - x^3)y$.

(Correction page 173)

Exercice II.4.3. a) Montrer que l'application

$$T : (r, \theta) \in U =]0, +\infty[\times]-\pi, \pi[\mapsto (r \cos \theta, r \sin \theta)$$

est un C^1 difféomorphisme entre U et $V = \mathbb{R}^2 \setminus (\{0\} \times \mathbb{R}_-)$.

b) On considère une fonction f de V dans \mathbb{R} , et l'on note g sa version polaire, i.e. $g(r, \theta) = f(r \cos \theta, r \sin \theta)$. Préciser le lien entre les différentielles de f et de g . (Correction page 173)

Exercice II.4.4. On note $U = \mathbb{R}^2 \setminus \{(0, 0)\}$. Montrer que l'application

$$\varphi, (x, y) \in U \mapsto (x^2 - y^2, 2xy) \in \mathbb{R}^2$$

est un difféomorphisme local, mais pas global.

Exercice II.4.5. (Dépendance d'une racine simple d'un polynôme réel vis-à-vis des coefficients)

A toute collection de coefficients $c = (c_0, c_1, \dots, c_N) \in \mathbb{R}^{N+1}$ on associe le polynôme

$$P_c(X) = c_0 + c_1X + \dots + c_NX^N.$$

On se donne \tilde{c} et \tilde{z} tels que $\tilde{z} \in \mathbb{R}$ est racine *simple* du polynôme $P_{\tilde{c}}$. Montrer qu'il existe une fonction différentiable Ψ des coefficients, définie dans un voisinage U de \tilde{c} , telle que $\tilde{z} = \Psi(\tilde{c})$ et telle que, pour tout $c \in U$, $z = \Psi(c)$ est racine du polynôme P_c .

Exprimer la différentielle de Ψ .

(Correction page 173)

Exercice II.4.6. (Dépendance d'une racine simple d'un polynôme complexe vis-à-vis des coefficients (version complexe de l'exercice II.4.5))

À toute collection de coefficients $c = (c_0, \dots, c_n) \in \mathbb{C}^n$ on associe le polynôme

$$P_c(X) = c_0 + c_1X + \dots + c_nX^n.$$

On se donne \tilde{c} et \tilde{z} tels que $\tilde{z} \in \mathbb{C}$ est racine *simple* du polynôme $P_{\tilde{c}}$. Montrer qu'il existe une fonction différentiable Ψ des coefficients, définie dans un voisinage U de \tilde{c} , telle que $\tilde{z} = \Psi(\tilde{c})$ et telle que, pour tout $c \in U$, $z = \Psi(c)$ est racine du polynôme P_c .

(Correction page 174)

Exercice II.4.7. On se propose d'étudier un modèle simplifié de bilan radiatif de la terre, basé sur l'écriture d'un équilibre entre l'énergie solaire reçue par la terre et l'énergie ré-émise par rayonnement, supposé suivre la loi de Stefan-Boltzman. On note F le flux de rayonnement solaire reçu en moyenne par unité de surface sur terre, $F_0 \approx 341 \text{ W m}^{-2}$. On considère qu'une fraction $A \in [0, 1]$ de cette énergie est immédiatement réfléchi, où A_0 , appelé *albedo*, est autour de 0.3. L'énergie émise en moyenne par unité de surface par la terre s'écrit σT^4 , où T est la température moyenne (exprimée en Kelvin), et $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$. On considère qu'une fraction de cette énergie n'est pas rayonnée vers l'espace, du fait de l'effet de serre. On note $S \in [0, 1]$ la fraction d'énergie qui n'est pas évacuée vers l'espace. Ce paramètre est estimé à $S = 0.4$. En supposant que l'on est à l'équilibre, on écrit le bilan entre les énergies reçues et émises :

$$\sigma T^4(1 - S) = (1 - A)F.$$

a) Estimer la température moyenne T_0 à la surface de la terre associée aux valeurs de référence S_0 , A_0 et F_0 selon ce modèle, et estimer la valeur qu'aurait cette température s'il n'y avait pas d'effet de serre (en supposant que le modèle reste valide¹³).

b) Montrer¹⁴ que, au voisinage du point d'équilibre considéré, on peut exprimer la température comme une fonction continûment différentiable des paramètres S , A , et F .

Exprimer la différentielle de cette fonction, et en déduire le coefficient de proportionnalité entre une variation de S autour de la valeur S_0 et la variation en degrés de la température. Quelle variation de S induit une augmentation de la température de 2°C ?

Si l'on mesure une petite variation de température de δT autour de T_0 , que peut-on dire (toujours dans l'hypothèse où l'on accorde une foi absolue au modèle) des variations δS , δA , et δF qui ont pu induire cette variation de température?

c) On estime que le CO_2 est responsable de 60 % de l'effet de serre dû aux Gaz à Effets de Serre (GES), eux-mêmes responsables de 30 % de l'effet de serre global. Si l'on admet que l'effet de serre dû au CO_2 est proportionnel à sa concentration dans l'atmosphère, estimer l'augmentation du taux de CO_2 qui conduirait, selon ce modèle à une augmentation de la température de 2°C .

13. Vue la baisse de température importante induite par cette suppression virtuelle de l'effet de serre, une grande part de l'eau liquide (peu réfléchissante) à la surface du globe se transformerait en glace (fort pouvoir réfléchissant), ce qui entraînerait une augmentation significative de l'albedo A , qui réduirait encore la température d'équilibre.

14. Même si cela n'est pas à strictement parler nécessaire ici, on s'efforcera de *jouer le jeu* en utilisant le théorème des fonctions implicites.

d) On considère que l'albedo dépend lui même de la température : une augmentation de la température est susceptible d'induire une fonte des glaces, qui diminue la part de surface fortement réfléchissante, d'où une diminution de l'albedo. On écrit donc, pour encoder ce phénomène,

$$A = A_0 - \beta(T - T_0),$$

avec $\beta > 0$ (exprimé en K^{-1}). On considérera par ailleurs le terme F de flux radiatif fixé à sa valeur de référence F_0 . Faire l'étude de ce nouveau modèle au voisinage du point d'équilibre de référence (S_0, T_0) .

e) (★) L'effet de serre, qui dépend par exemple de la masse nuageuse présente en moyenne dans l'atmosphère, dépend lui-même de la température. Explorer la manière dont cette dépendance est susceptible d'affecter les considérations précédentes (on pourra écrire S comme la somme d'un terme dépendant du CO_2 , et d'autres termes susceptibles de dépendre directement de la température).
(Correction page 175)

II.5 Dérivées d'ordre supérieur

Cette section porte sur les dérivées d'ordre supérieur. Nous nous focalisons au départ sur la différentielle seconde d'une fonction scalaire, et sur la notion de *matrice hessienne* qui permet de la représenter dans une base orthonormée, puis nous présentons un cadre plus abstrait permettant de généraliser ces notions à des applications à valeurs dans un espace multidimensionnel, et de définir une notion de dérivation à un ordre arbitraire.

II.5.1 Dérivées partielles d'ordre supérieur pour les fonctions scalaires

Définition II.5.1. (Dérivées partielles d'ordre 2)

Soit f une application d'un ouvert U de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R} . On suppose que f admet des dérivées partielles $\partial f / \partial x_i$ continues sur U (f est donc continûment différentiable d'après la proposition II.1.8). Si chacune de ces dérivées partielles est dérivable en x par rapport à chacune des variables, on appelle dérivées partielles d'ordre 2 les quantités correspondantes, notées

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right).$$

Définition II.5.2. (Matrice hessienne)

Dans le cadre de la définition précédente, on appelle *matrice hessienne* en x , et l'on note $H_f(x)$ (ou plus simplement $H(x)$ s'il n'y a pas d'ambiguïté) la matrice carrée dont les éléments sont les dérivées partielles d'ordre 2

$$H(x) = \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}(x) \right).$$

La proposition qui suit, capitale, établit que, si les dérivées secondes sont définies au voisinage d'un point x , et sont continues en ce point, alors la matrice hessienne est symétrique.

Théorème II.5.3. (Schwarz)

Soit f une application d'un ouvert U de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R} , et $x \in U$. On suppose que f admet des dérivées partielles d'ordre 2 dans un voisinage de x , et que ces dérivées partielles sont *continues* en x . Alors la matrice hessienne en x est *symétrique*, i.e.

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}.$$

Démonstration. On considère une fonction de 2 variables seulement (on peut se ramener à ce cas-là en gelant $n - 2$ variables). L'idée est d'écrire de deux manières la quantité

$$f(x_1 + h_1, x_2 + h_2) - f(x_1, x_2),$$

en suivant deux chemins différents entre (x_1, x_2) et $(x_1 + h_1, x_2 + h_2)$. On a en premier lieu

$$f(x_1 + h_1, x_2 + h_2) - f(x_1, x_2) = f(x_1 + h_1, x_2 + h_2) - f(x_1 + h_1, x_2) + f(x_1 + h_1, x_2) - f(x_1, x_2).$$

Les 2 derniers termes s'écrivent

$$f(x_1 + h_1, x_2) - f(x_1, x_2) = h_1 \partial_1 f(x_1, x_2) + \frac{h_1^2}{2} \partial_{11} f(x_1 + \theta_1 h_1, x_2),$$

avec $\theta_1 \in]0, 1[$. La première différence du membre de droite s'écrit elle

$$f(x_1 + h_1, x_2 + h_2) - f(x_1 + h_1, x_2) = h_2 \partial_2 f(x_1 + h_1, x_2) + \frac{h_2^2}{2} \partial_{22} f(x_1 + h_1, x_2 + \theta_2' h_2)$$

Si l'on écrit maintenant la même quantité $f(x_1 + h_1, x_2 + h_2) - f(x_1, x_2)$ de la façon suivante

$$f(x_1 + h_1, x_2 + h_2) - f(x_1, x_2) = f(x_1 + h_1, x_2 + h_2) - f(x_1, x_2 + h_2) + f(x_1, x_2 + h_2) - f(x_1, x_2),$$

que l'on utilise des développements de Taylor-Lagrange comme précédemment, et que l'on identifie les deux écritures, on obtient

$$\begin{aligned} 0 &= h_2 h_1 \left(\frac{\partial_2 f(x_1 + h_1, x_2) - \partial_2 f(x_1, x_2)}{h_1} - \frac{\partial_2 f(x_1, x_2 + h_2) - \partial_2 f(x_1, x_2)}{h_2} \right) \\ &+ \frac{h_2^2}{2} (\partial_{22} f(x_1 + h_1, x_2 + \theta'_2 h_2) - \partial_{22} f(x_1, x_2 + \theta_2 h_2)) \\ &+ \frac{h_1^2}{2} (\partial_{11} f(x_1 + \theta'_1 h_1, x_2 + h_2) - \partial_{11} f(x_1 + \theta_1 h_1, x_2)). \end{aligned}$$

Si l'on prend maintenant h_1 et h_2 égaux à ε , et que l'on fait tendre ε vers 0, les deux derniers termes sont des $o(\varepsilon^2)$ par continuité de la dérivée seconde. Le premier terme doit donc lui-même être un $o(\varepsilon^2)$, ce qui impose que la quantité entre parenthèse converge vers 0 avec ε , d'où le résultat. \square

Définition II.5.4. (Continue différentiabilité)

Soit f une application d'un ouvert U de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R} . On dit que f est deux fois continûment différentiable sur U , et l'on écrit $f \in C^2(U)$, si toutes les dérivées partielles d'ordre 2 de f existent et sont continues sur U , ce qui est équivalent à dire que f admet une matrice hessienne $H(x)$ en tout point x de U , et que la correspondance $x \mapsto H(x)$ est continue.

Remarque II.5.5. En toute rigueur (voir à la fin de la section pour plus de détail), mais au prix de certaines définitions abstraites que nous avons choisi d'écarter, nous devrions définir la différentielle seconde comme l'application différentielle de la différentielle : $d^2 f = d(df)$, c'est à dire comme une application linéaire de \mathbb{R}^n dans l'espace des applications linéaires de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R} . Et ensuite dire que l'application est C^2 si cette correspondance est continue, indépendamment des dérivées partielles premières ou secondes afférentes à une base particulière. On peut néanmoins montrer, dans l'esprit de la proposition II.1.8 pour les différentielles d'ordre 1, que la continuité de toutes les dérivées partielles secondes implique le caractère C^2 . Il est donc licite de fonder la définition précédente sur la caractérisation basée sur les dérivées partielles.

Proposition II.5.6. (Développement limité du gradient)

Soit f une application définie d'un ouvert $U \subset \mathbb{R}^n$ dans \mathbb{R} , deux fois continûment différentiable sur U . On a alors (h est pris suffisamment petit pour que $x + h \in U$)

$$\nabla f(x + h) = \nabla f(x) + H(x) \cdot h + \varepsilon(h) \|h\|.$$

Démonstration. Pour tout $i = 1, \dots, N$, la fonction $y \mapsto \partial_i f(y)$ est continûment différentiable sur U , et l'on a

$$\begin{aligned} \partial_i f(x + h) &= \partial_i f(x) + \langle \nabla \partial_i f(x) | h \rangle + \varepsilon(h) \|h\| \\ &= \partial_i f(x) + \sum_{j=1}^N \partial_j \partial_i f(x) h_j + \varepsilon(h) \|h\| \\ &= \partial_i f(x) + H \cdot h + \varepsilon(h) \|h\|, \end{aligned}$$

qui est l'identité annoncée. \square

Proposition II.5.7. (Développement limité à l'ordre 2)

Soit f une application définie d'un ouvert $U \subset \mathbb{R}^n$ dans \mathbb{R} , deux fois continûment différentiable sur U . On a alors (h est pris suffisamment petit pour que $x + h \in U$)

$$f(x + h) = f(x) + \langle \nabla f(x) | h \rangle + \frac{1}{2} \langle h | H(x) \cdot h \rangle + \varepsilon(h) \|h\|^2.$$

Démonstration. On introduit la fonction

$$h \longmapsto g(h) = f(x+h) - f(x) - \langle \nabla f(x) | h \rangle - \frac{1}{2} \langle h | H(x) \cdot h \rangle.$$

On a

$$\nabla g(h) = \nabla f(x+h) - \nabla f(x) - H(x) \cdot h = \|h\| \varepsilon(h)$$

d'après la proposition II.5.6. Pour tout $\epsilon > 0$, il existe donc $\eta > 0$ tel que, pour tout h tel que $\|h\| \leq \eta$,

$$\|\nabla g(h)\| \leq \epsilon \|h\|.$$

On applique à présent le théorème des accroissements finis II.1.19 :

$$\|g(h)\| = \|g(h) - g(0)\| \leq \sup_{h' \in [0, h]} \|\nabla g(x+h')\| \|h\| \leq \epsilon \|h\|^2,$$

avec $g(h) = f(x+h) - f(x) - \langle \nabla f(x) | h \rangle - \frac{1}{2} \langle h | H(x) \cdot h \rangle$. □

Proposition II.5.8. (Développement de Taylor avec reste intégral)

Soit f une application définie d'un ouvert $U \subset \mathbb{R}^n$ dans \mathbb{R} , deux fois continûment différentiable sur U , et h tel que le segment $[x, x+h] = \{x + \theta h, \theta \in [0, 1]\}$ soit inclus dans U . On a alors

$$f(x+h) = f(x) + \langle \nabla f(x) | h \rangle + \int_0^1 \langle H(x+th) \cdot h | h \rangle (1-t) dt.$$

Démonstration. On pose $\Phi(t) = f(x+th)$. On a, par intégration par parties,

$$\begin{aligned} \Phi(1) &= \Phi(0) + \int_0^1 \Phi'(t) dt = \Phi(0) - [\Phi'(t)(1-t)]_0^1 + \int_0^1 \Phi''(t)(1-t) dt \\ &= \Phi(0) + \Phi'(0) + \int_0^1 \Phi''(t)(1-t) dt. \end{aligned} \tag{II.5.1}$$

On a

$$\Phi(t) = f(x+th),$$

$$\Phi(t+\varepsilon) = f(x+th+t\varepsilon) = f(x+th) + \langle \nabla f(x+th) | h \rangle \varepsilon + o(\varepsilon),$$

et donc

$$\Phi'(t) = \langle \nabla f(x+th) | h \rangle.$$

Enfin

$$\Phi'(t+\varepsilon) = \langle \nabla f(x+th+\varepsilon h) | h \rangle + \langle \nabla f(x+th) | h \rangle + \langle H(x+th) \cdot h | h \rangle \varepsilon + o(\varepsilon),$$

d'où

$$\Phi''(t) = \langle H(x+th) \cdot h | h \rangle.$$

On injecte ces expressions dans (II.5.1), ce qui donne la formule annoncée. □

Définition II.5.9. (Laplacien)

Soit f une fonction définie sur un ouvert U de \mathbb{R}^n , à valeurs dans \mathbb{R} . On suppose que la matrice hessienne est définie en $x \in U$. On appelle laplacien de f en x , la quantité

$$\Delta f = \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} = \text{tr}(H)$$

(trace de la hessienne de f). Pour les fonctions telles que cette quantité est définie sur U , on appelle *laplacien* cet opérateur noté Δ .

II.5.2 Différentielles d'ordre supérieur pour les fonctions de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^m

La notion de différentielle seconde découle de celle de la différentielle. Comme pour les fonction de \mathbb{R} dans \mathbb{R} , la différentielle seconde sera simplement la différentielle de la différentielle. Pour une fonction de départ de \mathbb{R} dans \mathbb{R}^m , cette différentielle est une application de \mathbb{R}^n dans $\mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$ (définition II.1.4). Si nous souhaitons dériver cette différentielle, nous avons besoin d'une définition un peu plus générale, qui porte sur des applications à valeurs dans un espace vectoriel normé E .

Définition II.5.10. (Différentielle (•))

Soit f une application définie d'un ouvert $U \subset \mathbb{R}^n$ dans un espace vectoriel normé E . On dit que f est différentiable en $x \in U$ s'il existe une application linéaire de \mathbb{R}^n dans E , notée $df(x)$, telle que

$$f(x+h) = f(x) + df(x) \cdot h + \varepsilon(h) \|h\| \quad (\text{II.5.2})$$

où $\varepsilon(h)$ est une application de \mathbb{R}^n dans E , telle que $\|\varepsilon(h)\|$ tend vers 0 quand h tend vers 0.

Définition II.5.11. (Différentielle seconde (•••))

Soit f une application différentiable dans un voisinage U d'un point $x \in \mathbb{R}^n$, à valeurs dans \mathbb{R}^m . On dit que f est deux fois différentiable en $x \in U$ si l'application $x \mapsto df(x) \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$ (muni de la norme d'opérateur canonique) est différentiable en x . La différentielle de df en x , notée $d^2f(x)$, est une application linéaire de \mathbb{R}^n dans $\mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$.

On peut de la même manière, si df^2 est définie dans un voisinage de x , définir la différentielle d'ordre 3 par $d^3f = d(d^2f)$, qui est une application de \mathbb{R}^n dans $\mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m))$, et les différentielles d'ordre $k = 4, 5, \dots$

II.6 Éléments d'analyse fonctionnelle

Cette section propose une introduction aux espaces vectoriels normés de dimension infinie, i.e. qui ne sont pas engendrés par un nombre fini d'éléments. On se gardera pourtant de dire qu'ils sont engendrés par nombre infini d'éléments car les bases vectorielles (dont on ne peut en général montrer l'existence que par un argument fondé sur l'axiome du choix) sont complètement *inutilisables* en général. La définition d'un espace vectoriel est en revanche exactement la même qu'en dimension finie, ainsi que la définition d'une norme (voir définition I.2.7, page 8). Ce cadre abstrait est adapté aux espaces de fonctions (espaces de fonctions continues, différentiables, espaces L^p , espaces de Sobolev, ...), les "points" de ces espaces sont alors des fonctions, ce qui justifie l'appellation *Analyse Fonctionnelle*.

Définition II.6.1. (Espace de Banach)

Soit E un espace vectoriel normé (e.v.n.). Si E est complet pour la distance associée à la norme, on dit que E est un espace de Banach.

On utilisera en général ce terme pour des espaces de dimension infinie, même si de fait tout espace de dimension finie est un espace de Banach (voir proposition I.5.5, page 16).

Exercice II.6.1. Montrer que l'espace vectoriel X des suites nulles au-delà d'un certain rang, muni de la norme ∞ , n'est pas complet. (Correction page 159)

Proposition II.6.2. Soit F une application linéaire de E dans F , deux espaces vectoriels normés. Alors F est continue si et seulement si elle est bornée sur la boule unité de E . On note $\mathcal{L}(E, F)$ l'espace vectoriel des applications linéaires continues de E dans F . C'est un e.v.n. pour la norme d'opérateur

$$\|T\| = \sup_{x \neq 0} \frac{\|Tx\|_F}{\|x\|_E}.$$

Si F est complet, alors $\mathcal{L}(E, F)$ est un espace de Banach.

Définition II.6.3. (Dual topologique)

Soit E un espace vectoriel normé (e.v.n.). On appelle dual topologique de E , et l'on note E' , l'ensemble des formes linéaires (applications linéaires à valeurs dans \mathbb{R}) continues. C'est un e.v.n. pour la norme

$$\|\varphi\|_{E'} = \sup_{x \neq 0} \frac{|\langle \varphi, x \rangle|}{\|x\|_E} = \sup_{\|x\| \leq 1} \langle \varphi, x \rangle.$$

Remarque II.6.4. Si E est de dimension finie, toutes les formes linéaires sont continues. Ce n'est pas le cas en dimension infinie. Considérons par exemple l'espace vectoriel X des suites nulles au-delà d'un certain rang, muni de la norme $\|\cdot\|_\infty$. La forme

$$\varphi : u = (u_n) \longmapsto \sum_{n=1}^{+\infty} u_n$$

(on gardera en tête qu'il s'agit en fait d'une somme *finie*) n'est pas bornée sur la boule unité, elle n'est donc pas continue¹⁵.

Théorème II.6.5. (Hahn-Banach, forme analytique)

Soit E un e.v.n. et $G \subset E$ un sous-espace vectoriel. On considère φ une forme linéaire sur G , continue,

15. On notera que l'exemple choisi s'appuie sur un e.v.n. qui n'est pas complet. De fait, on s'épargnera de chercher à construire un exemple explicite d'application linéaire non continue sur un espace complet, une telle construction ne peut qu'être abstraite et nécessite l'axiome du choix.

de norme

$$\|\varphi\|_{G'} = \sup_{\|x\| \leq 1} \langle \varphi, x \rangle.$$

Il existe $f \in E'$ qui prolonge φ , telle que $\|f\|_{E'} = \|\varphi\|_{G'}$.

Définition II.6.6. (Séparabilité)

Un e.v.n. E est dit séparable s'il existe une partie dénombrable dense dans E .

Comme pour la complétude, cette propriété est immédiatement vérifiée pour tout e.v.n. de dimension finie (\mathbb{Q}^n est dense dans \mathbb{R}^n), elle n'a donc de pertinence que pour les espaces de dimension infinie.

Exercice II.6.2. a) Montrer que l'espace ℓ^∞ , espace des suites réelles bornées muni de la norme

$$\|u\|_\infty = \sup |u_n|,$$

n'est *pas séparable*

b) Montrer qu'en revanche le sous-espace $c_0 \subset \ell^\infty$ des suites qui tendent vers 0 est séparable. (Correction page 159)

c) Montrer que, pour $p \in [1, +\infty[$ l'espace

$$\ell^p = \left\{ u = (u_n) \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}, \sum u_n^p < +\infty \right\},$$

muni de la norme

$$\|u\| = \left(\sum_{n=0}^{+\infty} |u_n|^p \right)^{1/p},$$

est séparable.

II.7 Exercices

Exercice II.7.1. Calculer les matrices hessiennes des applications suivantes

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{2}(x_1^2 + x_2^2), \quad f(x, y) = x_1^p x_2^q.$$

(Correction page 176)

Exercice II.7.2. Soit A une matrice carrée d'ordre n , et f l'application quadratique de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R} définie par

$$x = (x_1, \dots, x_n) \mapsto f(x) = \langle A \cdot x \mid x \rangle.$$

a) Calculer la matrice Hessienne de f .

b) Dans quel cas cette matrice hessienne est-elle nulle ?

(Correction page 176)

Exercice II.7.3. Soit f une fonction deux fois continûment différentiable au voisinage d'un point $x \in \mathbb{R}^n$, et h un vecteur de \mathbb{R}^n .

a) Quelle est la limite de

$$\frac{f(x - \varepsilon h) - 2f(x) + f(x + \varepsilon h)}{\varepsilon^2}$$

quand ε tend vers 0 ?

b) Soit f une fonction deux fois continûment différentiable sur un ouvert convexe U . On suppose de plus f convexe, c'est-à-dire telle que

$$f((1 - \theta)x + \theta y) \leq (1 - \theta)f(x) + \theta f(y) \quad \forall x, y \in U, \quad \forall \theta \in]0, 1[.$$

Montrer que pour tout x de U , la matrice H est positive, c'est à dire que

$$\langle H(x) \cdot h \mid h \rangle \geq 0 \quad \forall h \in \mathbb{R}^n.$$

c) Soit f une fonction deux fois continûment différentiable sur un ouvert convexe U . On suppose que f est λ -convexe, c'est-à-dire telle que

$$f((1 - \theta)x + \theta y) \leq (1 - \theta)f(x) + \theta f(y) - \frac{\lambda}{2}\theta(1 - \theta) \|y - x\|^2 \quad \forall x, y \in U, \quad \forall \theta \in]0, 1[.$$

avec $\lambda \in \mathbb{R}$. Que peut-on en déduire sur la matrice $H(x)$, pour $x \in U$?

d) (Condition suffisante d'optimalité locale)

On considère f une fonction deux fois continûment différentiable sur un ouvert U . On considère un point $x \in U$ en lequel le gradient de f s'annule, et tel que les valeurs propres de $H(x)$ sont toutes strictement positives. Que peut on dire de x vis-à-vis de f ?

e) (Condition suffisante d'optimalité globale)

On suppose maintenant l'ouvert U convexe, et f convexe sur U . Montrer que x minimise f sur U , c'est à-dire-que

$$f(y) \geq f(x) \quad \forall y \in U.$$

f) (Condition nécessaire d'optimalité)

On considère pour finir f une fonction deux fois continûment différentiable sur un ouvert U . On suppose que $x \in U$ est un minimiseur local de f . Montrer que $\nabla f(x) = 0$, et que $H(x)$ est une matrice positive.

(Correction page 177)

Exercice II.7.4. Soit f une fonction deux fois continûment différentiable sur un ouvert U de \mathbb{R}^n , et telle que ∇f est de norme constante égale à un sur U . Montrer que

$$H(x) \cdot \nabla f(x) = 0.$$

pour tout x dans U .

(Correction page 177)

Exercice II.7.5. On cherche ici à exprimer le fait que le laplacien quantifie l'écart entre la valeur ponctuelle d'une fonction et la moyenne des valeurs de la fonction au voisinage de ce point. En dimension 1, une telle propriété est donnée par le a) de l'exercice II.7.3. En dimension 2, cette propriété prend la forme exprimée ci-dessous.

Soit f une fonction à valeurs réelles deux fois continûment différentiable au voisinage d'un point $x \in \mathbb{R}^2$. On note e_θ le vecteur unitaire $(\cos \theta, \sin \theta)$. Montrer que

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (f(x + \varepsilon e_\theta) - f(x)) d\theta = \frac{1}{4} \Delta f(x).$$

(Correction page 177)

Chapitre III

Mesure et intégration

Sommaire

III.1 Motivations, vue d'ensemble	63
III.2 Tribus, espaces mesurables	68
III.2.1 Tribus	68
III.2.2 Applications mesurables	71
III.2.3 Classes monotones	72
III.3 Mesures	74
III.4 Mesures extérieures	78
III.4.1 Définitions, premières propriétés	78
III.4.2 D'une mesure extérieure à une mesure	79
III.4.3 Mesure de Lebesgue	81
III.5 Compléments	84
III.6 Exercices	87
III.7 Fonctions mesurables, intégrale de Lebesgue	91
III.7.1 Fonctions mesurables	91
III.7.2 Intégrale de fonctions étagées	94
III.7.3 Intégrale de fonctions mesurables	97
III.7.4 Théorèmes fondamentaux	100
III.8 Intégrales multiples	102
III.9 Changements de variable	107
III.10 Les espaces L^p	108
III.10.1 L'espace $L^\infty(X)$	109
III.10.2 Les espaces $L^p(X)$, pour $p \in [1, +\infty[$	110
III.10.3 Les espaces $L^p(\mathbb{N}) = \ell^p$ et $L^p(\mathbb{R}^d)$	112
III.11 Compléments	114
III.12 Exercices	115

III.1 Motivations, vue d'ensemble

Cette première section précise au travers d'exemples la nature des objets abstraits construits dans les sections suivantes, et les difficultés associées à cette construction. La notion centrale est celle de *mesure*. Comme cadre conceptuel d'appréhension du réel, cette notion unique de mesure répond à deux enjeux, qu'il nous paraît important de distinguer malgré le fait qu'ils correspondent à la même notion mathématique.

En premier lieu, une mesure permet de structurer le fond d'un espace destiné à accueillir de la matière. Par espace nous entendons par exemple l'espace euclidien usuel, qui est en dimension 3 un modèle de l'espace physique dans lequel nous vivons, sur lequel il peut être pertinent de définir des *champs* (champ de densité, de concentration d'un polluant, de température, de densité de population, ...). Considérons par exemple un milieu occupant une certaine zone de l'espace euclidien, milieu dont on connaît la densité. Si l'on suppose la densité constante sur une zone A , la masse portée par A est le produit entre cette valeur de densité et le volume de la zone. Il est donc essentiel de savoir estimer le volume des zones susceptibles d'accueillir de la matière, pour pouvoir estimer la masse correspondante. Définir une mesure consiste précisément à concevoir une procédure pour associer à une zone son volume. Même s'il n'est pas dans les usages d'affecter une unité physique aux grandeurs mathématiques, on pourra concevoir cette mesure comme s'exprimant en unité de volume (ou d'aire s'il s'agit de l'espace bi-dimensionnel, ou de longueur s'il s'agit d'un espace à une dimension). Il s'agit d'une donnée *statique* associée à l'espace considéré. Dans le cas de l'espace euclidien, ce volume est canoniquement défini dans le cas de formes simples : longueur d'un intervalle, aire d'un rectangle, volume d'un parallélogramme. La notion d'intégration d'une fonction constante sur de tels ensembles est basée sur le simple produit de la valeur à intégrer par le volume. Si, suivant l'intuition associée à la notion de volume, on décide que le volume de la réunion de deux zones disjointes est la somme des volumes des zones élémentaires, on peut estimer le volume de toutes les zones qui peuvent se construire comme réunion disjointe finie de ces formes simples. Définir le volume de n'importe quel ensemble est plus délicat et même, d'une certaine manière, impossible, comme nous le verrons. La construction de la mesure de Lebesgue, qui est un point essentiel des sections qui suivent, permettra de définir un tel volume pour une classe très générale de zones de l'espace euclidien, et permettra de construire un cadre définissant la notion d'intégrales pour des fonctions très générales.

Les mesures ont également vocation à représenter des quantités absolues de matière (fluides, matériau solide, cellules, individus, ...), distributions d'une certaine substance susceptible d'évoluer en temps, d'être transportée, supprimée, développée. L'objet mathématique associé est le même, mais la nature de la réalité qu'il a vocation à représenter est différente. Il sera ici naturel de penser la mesure associée comme exprimée en kg, en moles ..., qui mesurent des quantités de matières associées à des principes de conservation.

Nous proposons dans les paragraphes qui suivent quelques exemples de situations réelles qui illustrent les deux types de mesures évoqués ci-dessus et les liens qu'elles entretiennent : mesures de type *volume*, qui formalisent la capacité de parties de l'espace sous-jacent à accueillir de la matière, et mesures de type *masse*, qui représentent des quantités de choses réelles. Nous nous restreignons dans ces exemples à des ensembles finis, de telle sorte que les objets mathématiques sont très simples à définir. Nous évoquerons dans la suite de cette introduction les difficultés posées par la construction de telles mesures pour des ensembles infinis.

Superficies, densités, et nombre d'habitants.

Considérons l'ensemble $X = \llbracket 1, N \rrbracket$ des grandes villes françaises, numérotées de 1 à N . On note $\mu_i > 0$ la superficie de la ville i . À la collection des μ_i est naturellement associée une application μ de l'ensemble $\mathcal{P}(X)$ des parties de X dans \mathbb{R}_+ :

$$\mu : A \in \mathcal{P}(X) \mapsto \mu(A) = \sum_{i \in A} \mu_i \in \mathbb{R}_+. \quad (\text{III.1.1})$$

Cette application est *additive* au sens où, si A et B sont disjoints, $\mu(A \cup B) = \mu(A) + \mu(B)$. Pour reprendre une terminologie physique, cette application définit une variable *extensive*.

Il s'agit d'une mesure au sens volumique évoqué ci-dessus, qui structure l'ensemble des villes en termes de capacité d'accueil. Notons maintenant ρ_i la densité d'habitants dans la ville i . Il s'agit là d'une variable *intensive*¹. Le produit $m_i = \rho_i \mu_i$ est le nombre d'habitants dans cette ville i . On peut, comme précédemment pour les μ_i , associer à la collection des villes une application m de $\mathcal{P}(X)$ dans

1. La densité associée à la réunion de deux villes de même densité ρ est ρ , et pas 2ρ .

\mathbb{R} , additive par construction. Cette application est une nouvelle mesure sur X , de type “masse”. Le nombre total d’habitants dans le sous-ensemble $A \subset X$ de villes peut s’écrire comme un produit de dualité² noté $\langle \rho, \mu \rangle_A$ entre les collections de superficies et de densités

$$m_A = \langle \rho, \mu \rangle_A = \sum_{i \in A} \rho_i \mu_i.$$

Il s’agit là de la version discrète d’une intégrale, construite par mise en dualité d’une mesure volume (μ , version discrète de la mesure de Lebesgue construite plus loin) et d’une variable intensive (densité ρ , qui joue le rôle d’une fonction à intégrer sur un domaine). La mesure masse m est la variable sommable, produit de la variable extensive μ et la variable intensive ρ .

On peut aussi définir, dans le cas présent d’une collection finie de villes, des mesures qui correspondent à des probabilités. Prenons l’exemple d’un crime commis à Paris à l’heure H d’un jour J. Vingt-quatre heures après, l’assassin court toujours, et les enquêteurs cherchent à estimer dans quelle ville il pourrait être. L’état de leur opinion concernant la position du fugitif peut être encodé par une mesure $m = (m_i)$. Si l’on sait qu’il ne dispose pas de véhicule et que l’on considère que prendre le train était risqué pour lui, on considèrera que la probabilité associée à Paris est de 0.75. Si l’on sait qu’il a des contacts à Lyon, on évaluera à 0.15 la probabilité qu’il y soit, le complément étant distribué sur le reste du pays en fonction des informations que l’on peut avoir. On a ici l’exemple typique d’une mesure (ici de probabilité, c’est à dire normalisée à 1) qui évolue au cours du temps, en fonction des informations reçues.

L’intérêt d’introduire la notion de *mesure* pour les exemples ci-dessus, alors que les objets manipulés se ramènent à des tableaux de nombres réels, n’est pas immédiat. Nous verrons qu’il est néanmoins fécond de considérer par exemple la collection $\mu = (\mu_i)$ des superficies comme une application qui, à un ensemble de villes $I \subset \llbracket 1, N \rrbracket$, associe la population totale des villes concernées, selon l’expression (III.1.1). Cette application attribue 0 à l’ensemble vide, et vérifie par construction la règle de sommation suivante : l’image de la réunion de deux ensembles disjoints est la somme des images (on dira que l’application est *additive*), ce qui peut s’écrire

$$A \cap B = \emptyset \implies \mu(A \cup B) = \mu(A) + \mu(B).$$

Nous définirons une mesure comme une application qui à une partie associe un réel positif, et qui vérifie des conditions du type de celles qui précèdent.

Aérosols.

On considère maintenant une collection de N micro-gouttelettes sphériques flottant dans l’air. Si l’on note μ_i le volume de la gouttelette i , on peut définir une application de l’ensemble des parties de $X = \llbracket 1, N \rrbracket$ dans \mathbb{R}^+ associant à une sous-collection de gouttelettes son volume total. Si l’on note ρ la densité du fluide considéré, on peut associer à la collection une nouvelle mesure, de type masse, simplement définie par ses valeurs en chaque entité, $m_i = \rho \mu_i$, la mesure associée, définie comme application de $\mathcal{P}(X)$ dans \mathbb{R}_+ , s’en déduisant simplement par additivité. On a ainsi construit une nouvelle mesure exprimant une variable extensive, construite comme produit d’une première mesure volume avec une variable intensive. On peut dans ce contexte continuer l’empilement des mesures en considérant que chaque particule est animée d’une vitesse u_i . Cette collection de vitesses peut être vue comme une fonction sur X . Cette variable vectorielle intensive peut être adossée avec la mesure m (extensive) pour former une nouvelle variable extensive (la quantité de mouvement), construite selon $p_i = m_i u_i$. Il s’agit de la version discrète de ce que l’on appellera une *mesure vectorielle*. C’est une variable extensive (la quantité de mouvement d’un système est la somme des quantités de mouvement de ses constituants). Dans ce contexte, on dira que la vitesse est mesurable m -presque partout. Ici, l’ensemble étant fini, cela signifie simplement que cela n’a pas de sens de définir la vitesse d’un objet qui n’a pas de masse, puisque cette vitesse sans masse ne pourrait intervenir d’aucune manière dans un modèle mécanique cohérent.

2. Un produit de dualité entre deux espaces vectoriels E et F de même dimension est simplement une application bilinéaire de $E \times F$ dans \mathbb{R} . On dit que cette application met les espaces en dualité. L’exemple le plus simple est le cas d’un espace euclidien, qui est en dualité avec lui-même par le biais de son produit scalaire.

On remarquera que la variable intensive vitesse peut être intégrée selon cette nouvelle mesure vectorielle, pour former une quantité scalaire qui représente l'énergie cinétique

$$E_A = \langle u, p \rangle_A = \frac{1}{2} \sum_{i \in A} m_i u_i^2.$$

Vers l'infini : le cas de l'intervalle $]0, 1[$

Les cadres présentés ci-dessus peuvent être étendu assez naturellement à des ensembles dénombrables, on remplace alors les sommes finies par des sommes infinies, des séries, de nombres positifs, en acceptant éventuellement que la série puisse prendre la valeur $+\infty$. On remarquera néanmoins que, s'il est possible d'affecter une masse à chaque point d'une collection dénombrable de façon à ce que la masse totale soit *finie*, la distribution est forcément inégalitaire, ou identiquement nulle. En effet, si chaque point de notre ensemble dénombrable a une masse m , on a l'alternative suivante : si $m > 0$ la masse totale est infinie, et si $m = 0$ la masse totale est nulle. Une version temporelle de cet énoncé, qui évoque le paradoxe d'Achille et de la tortue, pourrait être : disposant d'un temps fini, on peut faire une infinité de choses qui chacune prend un certain temps, mais c'est impossible en attribuant un temps identique à chacune des tâches. On retrouvera cet argument très simple au cœur de la construction d'un des ensembles pathologiques évoqués ci-après.

Les véritables difficultés commencent lorsque l'on s'intéresse à des ensembles qui ont ce que l'on appelle la *puissance du continu*, comme la droite réelle, ou l'espace physique \mathbb{R}^3 . Considérons pour fixer les idées le cas de l'intervalle réel $X =]0, 1[$. On cherche à définir sur cet ensemble une notion de volume (il s'agit plutôt en l'occurrence d'une notion de longueur, que nous verrons ici comme un volume monodimensionnel). Plus précisément, on cherche à construire une *mesure*, c'est-à-dire une application μ qui à une partie A de $]0, 1[$ associe un nombre réel positif ou nul, et qui généralise à des ensembles quelconques la notion de longueur. On souhaite donc en particulier que $\mu([a, b]) = b - a$. Le caractère extensif de la notion de longueur impose une propriété d'additivité. On demande donc que la mesure d'une union d'ensembles disjoints soit égale à la somme des mesures des ensembles. Comme nous le verrons plus loin, il est nécessaire pour aboutir à une notion "utilisable" que cette propriété s'étende à des collections dénombrables de parties, on parlera de σ -*additivité*. L'intervalle fermé $[a, b]$ étant l'intersection des intervalles $]a - 1/n, b + 1/n[$, sa longueur est la même que celle de l'intervalle ouvert. On en déduit que la mesure des singletons (comme les extrémités de l'intervalle) est nulle. On peut étendre immédiatement cette mesure à des réunions dénombrables d'intervalles, mais on se heurte ensuite à un mur. Pour des raisons assez profondes qui tiennent à la nature même de la droite réelle, et malgré l'apparente simplicité du problème, il est *impossible* de définir une telle application, qui affecterait aux intervalles leurs longueurs, qui serait σ -additive (manière distinguée de dire que cela correspond à une variable extensive), qui affecterait à une partie quelconque de l'intervalle³ $]0, 1[$ ce qu'il conviendrait alors d'appeler sa longueur. On peut contourner le problème par le haut en suivant un principe inhérent à la notion intuitive de volume : si un ensemble est inclus dans un autre, ce dernier a un plus gros volume. Si l'on se donne $A \subset]0, 1[$, on peut considérer l'ensemble des collections dénombrables d'intervalles (on s'affranchit du caractère disjoint des collections) qui recouvrent A . Si l'on était capable de définir une mesure pour A , cette mesure serait inférieure ou égale à la mesure de toute collection qui recouvre A , qui est elle-même inférieure à la somme des longueurs des intervalles. Il est ainsi naturel de considérer la quantité $\mu^*(A)$ définie comme l'infimum de la somme des longueurs des intervalles, infimum sur l'ensemble des collections qui recouvrent A . On appellera cette quantité la *mesure extérieure* de Lebesgue de A . Cette démarche conduit néanmoins à un problème : il apparaît qu'il existe des parties de X qui vérifient des propriétés que nous qualifierons de *bizarres*. Il existe en effet des ensembles B , dont le complémentaire dans X est noté B^c , qui conduisent à une violation de la propriété d'additivité que l'on souhaite voir vérifier par la mesure. Plus précisément, il existe certaines parties B telles que, pour certaines parties A , l'identité

$$\mu^*(A) = \mu^*(A \cap B) + \mu^*(A \cap B^c)$$

3. On peut aussi formuler ce problème dans le plan \mathbb{R}^2 en considérant à la place des intervalles des rectangles, dont on sait calculer l'aire, ou dans l'espace physique \mathbb{R}^3 en considérant des pavés (i.e. parallélépipèdes), dont on sait calculer le volume.

n'est *pas vérifiée*. Plus précisément $\mu^*(A)$ est strictement inférieur à la somme des mesures des parties disjointes $A \cap B$ et $A \cap B^c$ qui le constituent. Le mathématicien se retrouve dans la position d'un arpenteur étudiant une région A , composée exclusivement de 2 propriétés A_1 et A_2 sans recouvrement, imbriquées l'une dans l'autre de façon extrêmement complexe, et telle que l'aire estimée de A selon la méthode évoquée ci-dessus est *strictement inférieure* à la somme des aires de A_1 et A_2 .

Il n'existe pas de manière complètement satisfaisante de régler ce nouveau problème. La démarche conduisant à des "monstres", on choisit simplement de les exclure de l'approche, et de se concentrer sur les parties B pour lesquelles l'identité ci-dessus est vérifiée pour toute partie A (parties appelées *mesurables*, et dont la collection s'appelle une *tribu* comme on le verra) pour définir une mesure. Cette mesure, qui est la restriction de la mesure extérieure ci-dessus à la collection \mathcal{A} des ensembles mesurables, vérifie alors de bonnes propriétés, au prix de *l'exclusion de certains ensembles pathologiques*, qu'il est d'ailleurs impossible de décrire explicitement⁴. Une fois cette construction réalisée, la définition de la notion d'intégrale s'ensuit naturellement. L'intégrale d'une fonction constante égale à ρ (que l'on peut voir ici comme une densité) sur une partie A est simplement le produit $\rho \times \mu(A)$, qui est alors la masse de la matière contenue dans A . On peut étendre facilement cette définition aux fonctions qui prennent un nombre fini de valeurs (fonctions dites *simples*, ou *étagées* dans le cadre de la théorie de la mesure) sur des parties mesurables, en sommant simplement les différentes contributions, comme pour calculer la masse d'un objet composite à partir des densités de ses constituants, et des volumes des différentes zones qu'ils occupent. On peut alors étendre cette notion d'intégrale à une classe très générale de fonctions (nous ne considérons pour l'instant que des fonctions positives), appelées *mesurables*, en définissant l'intégrale comme le supremum des intégrales des fonctions étagées qui sont partout inférieures ou égales à la fonction considérée.

Cadre général.

La démarche décrite précédemment s'inscrit dans un cadre général qui dépasse le cas particulier de la droite des réels, et qui constitue les bases de la théorie des probabilités. Les sections qui suivent présentent ce cadre abstrait, et en parallèle la construction progressive de l'intégrale de Lebesgue. Le point de départ est la notion de tribu déjà évoquée ci-dessous : une tribu sera définie comme une famille de parties d'un ensemble X qui vérifient un certain nombre de propriétés, essentiellement de stabilité (par complémentarité et par union dénombrable). On définira ensuite la notion de mesure sur une tribu, qui est une application à valeurs dans \mathbb{R}^+ , et a vocation à affecter à une partie de X son volume. On demandera assez naturellement à ce que "rien" ne prenne pas de place ($\mu(\emptyset) = 0$), et l'on exigera par ailleurs, pour respecter le caractère extensif de la notion que l'on souhaite définir, une propriété d'additivité : la mesure d'une union disjointe (dénombrable) de parties est la somme des mesures de ces parties. On donnera un sens très général à la notion de mesure extérieure, déjà évoquée plus haut dans le cas de l'intervalle $]0, 1[$, définie sur l'ensemble des parties d'un ensemble, en relaxant la propriété d'additivité (remplacée par une propriété de sous-additivité), et en imposant la monotonie (qui n'est plus garantie sinon, du fait que l'on a relaxé l'additivité). On qualifie alors de mesurable une partie qui vérifie la propriété d'additivité évoquée précédemment, et l'on peut montrer une propriété très générale : la famille des parties mesurables est une tribu, et la mesure extérieure restreinte à cette tribu est une *mesure*. C'est ce résultat qui permettra de définir la mesure de Lebesgue à partir de la mesure de Lebesgue extérieure introduite dans le paragraphe précédent.

Terminons cette longue introduction par quelques mots sur la théorie des probabilités, qui constitue une motivation importante à l'étude détaillée des notions de tribu, classe monotone, mesure, ..., même si elle n'est pas centrale dans ce cours. Dans ce contexte l'ensemble X est vu comme un ensemble d'*éventualités* (on parle de l'univers des possibles, issues possibles d'une expérience). Définir une tribu consiste à définir un sous-ensemble de parties que l'on souhaite considérer comme des *événements*, c'est-à-dire comme des propriétés vérifiées par le résultat de l'expérience, exprimées au travers de l'appartenance à une des sous-parties de la tribu. Par exemple si l'on sait qu'une météorite est tombée en Europe, on concevra X comme l'ensemble des positions géographiques de cette zone (que l'on peut identifier à une carte au sens usuel du terme). On peut imaginer une tribu comme un ensemble d'as-

4. La construction de ces contre-exemples nécessite l'*axiome du choix*, ce qui confère un caractère très abstrait à ces contre-exemples.

sertions potentiellement pertinentes. Par exemple : ‘La météorite est tombée en Alsace’, ‘La météorite n’est pas tombée en Alsace’, ‘La météorite est tombée à l’ouest de Berlin ou au nord d’Helsinki’, ‘La météorite est tombée en zone urbaine’, ‘La météorite n’est pas tombée en Europe’

Noter que l’on peut choisir de structurer l’ensemble des assertions potentiellement pertinentes de façon plus ou moins détaillée (ce qui correspondra à la notion de tribu plus ou moins *fine*). Si l’on ne s’intéresse qu’au pays atteint, on se limitera à des assertions du type : ‘La météorite est tombée dans un pays d’Europe du nord’, ce qui correspond à une tribu finie (un élément de la tribu est un sous-ensemble de pays, éventuellement vide). A l’autre extrême, on peut envisager l’ensemble des assertions possibles correspondant à une localisation exacte du point d’impact. Comme nous l’avons évoqué plus haut, c’est cette volonté de structurer un espace ayant la puissance du continu qui soulève des difficultés profondes, qui sont abordées dans les sections qui suivent. Dans le contexte des probabilités, la définition d’une mesure de masse totale 1 sur la tribu choisie permettra d’affecter à chacun de ses membres A un nombre quantifiant la probabilité que l’assertion $x \in A$ soit vérifiée. L’événement X , de probabilité 1, est certain, et l’événement vide, de probabilité nulle, est impossible (il correspond à la dernière assertion ci-dessus). Les opérations sur les parties - événements sont associées à des opérations logiques : $A \cup B$ correspond à l’événement $x \in A$ ou $x \in B$, $A \cap B$ correspond à l’événement $x \in A$ et $x \in B$.

III.2 Tribus, espaces mesurables

III.2.1 Tribus

Définition III.2.1. (Tribu / σ -algèbre (\bullet))

Soit X un ensemble. On appelle tribu (ou σ -algèbre) sur X un ensemble \mathcal{A} de parties de X qui vérifie les propriétés suivantes :

- (i) $\emptyset \in \mathcal{A}$,
- (ii) $A \in \mathcal{A} \implies A^c \in \mathcal{A}$,
- (iii) Si (A_n) est une collection dénombrable d’éléments de \mathcal{A} , alors

$$\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{A}.$$

Si la propriété (iii) est restreinte aux collections finies, on dira que \mathcal{A} est une *algèbre*.

On appelle (X, \mathcal{A}) (ensemble muni de sa tribu) un *espace mesurable*.

Définition III.2.2. (Finesse)

On considère deux tribus \mathcal{A} et \mathcal{A}' sur un même ensemble X . On dit que la tribu \mathcal{A}' est *plus fine* que la tribu \mathcal{A} si $\mathcal{A} \subset \mathcal{A}'$.

Proposition III.2.3. (\bullet) Toute tribu est stable par intersection dénombrable.

Démonstration. Soit (A_n) une collection dénombrable d’éléments d’une tribu \mathcal{A} . On a

$$\bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n = \left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n^c \right)^c,$$

qui appartient à \mathcal{A} par complémentarité et union dénombrable. □

Exemples III.2.1. Nous donnons ici quelques exemples de tribus associées à un ensemble X quelconque.

1. (Tribu discrète). Pour tout ensemble X , l'ensemble $\mathcal{P}(X)$ des parties de X est une tribu. Comme on le verra, dès que X est non dénombrable, par exemple sur \mathbb{R} , cette tribu est essentiellement *inutilisable*, car il est impossible de lui associer une mesure non triviale qui possède de bonnes propriétés.
2. (Tribu grossière). Pour tout ensemble X , $\{\emptyset, X\}$ est une tribu à 2 membres.

Exercice III.2.1. (Tribu trace)

Soit \mathcal{A} une tribu sur un ensemble X , et F une partie de X . Montrer que

$$\mathcal{A}_F = \{A \cap F, A \in \mathcal{A}\}$$

est une tribu sur F (appelée tribu trace de \mathcal{A} sur F).

(Correction page 179)

Proposition III.2.4. (Une intersection de tribus est une tribu (•))

Soit X un ensemble. Toute intersection de tribus sur X est une tribu.

Démonstration. C'est une conséquence directe de la définition. □

Comme pour toute propriété stable par intersection⁵, on peut définir la notion de plus petite tribu contenant une collection de parties de X .

Définition III.2.5. (Tribu engendrée (•))

Soit $\mathcal{C} \subset \mathcal{P}(X)$ une collection de parties de X . On appelle tribu engendrée par \mathcal{C} , et l'on note $\sigma(\mathcal{C})$, la plus petite tribu contenant \mathcal{C} . Elle est définie comme l'intersection de toutes les tribus contenant \mathcal{C} .

Exercice III.2.2. Soit X un ensemble et A une partie de X . Montrer que la tribu engendrée par $\{A\}$ est de cardinal 2 ou 4. (Correction page 179)

Exercice III.2.3. Soit X un ensemble et A, B et C des parties de X , non vides, et disjointes deux à deux. Quels sont les cardinaux possibles pour la tribu engendrée par $\{A, B, C\}$? (Correction page 179)

Définition III.2.6. (Tribu borélienne sur \mathbb{R} (•))

On appelle tribu borélienne sur \mathbb{R} la tribu engendrée par les ouverts de \mathbb{R} . On la note $\mathcal{B}(\mathbb{R})$.

Proposition III.2.7. (•) La tribu $\mathcal{B}(\mathbb{R})$ des boréliens de \mathbb{R} est engendrée par les intervalles de la forme $] - \infty, a]$, avec $a \in \mathbb{R}$.

Démonstration. Notons en premier lieu que le fermé $] - \infty, a]$ est le complémentaire d'un ouvert, tous ces intervalles sont donc dans $\mathcal{B}(\mathbb{R})$, la tribu engendrée est donc contenue dans la tribu des boréliens. Pour montrer l'inclusion réciproque, tout ouvert de \mathbb{R} étant réunion dénombrable d'intervalles ouverts (voir proposition I.3.11), il suffit de montrer que la tribu engendrée par les $] - \infty, a]$ contient les intervalles ouverts. Par complémentarité, cette tribu contient les intervalles du type $]a, +\infty[$. Par ailleurs, l'union des $] - \infty, b - 1/n]$ est l'intervalle $] - \infty, b[$. La tribu contient donc (d'après la stabilité par intersection assurée par la proposition III.2.3), pour tous $a < b$, l'intervalle $]a, +\infty[\cap] - \infty, b[=]a, b[$ ce qui termine la démonstration. □

Il sera utile lors de la construction de l'intégrale de considérer des fonctions réelles qui peuvent prendre des valeurs infinies ($+\infty$ ou $-\infty$), c'est-à-dire à valeurs dans la droite réelle achevée \mathbb{R} (voir

5. On pourra penser par exemple au fait, pour une partie de l'espace \mathbb{R}^d , d'être un sous-espace vectoriel, un sous-espace affine, d'être convexe, d'être fermée, d'être conique, ... On parle en général d'*enveloppe* linéaire, affine, convexe, fermée, conique. Le terme d'enveloppe n'est pas utilisé dans le cas des tribus, mais le principe de construction est le même.

définition I.3.12, page 13). Rappelons que les ouverts de cette droite réelle achevée sont les ensembles de type U , $U \cup]a, +\infty]$, $U \cup [-\infty, b[$, ou $U \cup]a, +\infty] \cup [-\infty, b[$, où U est un ouvert de \mathbb{R} (voir proposition I.3.13).

Proposition III.2.8. (•) La tribu $\mathcal{B}(\overline{\mathbb{R}})$ des boréliens de $\overline{\mathbb{R}}$ est engendrée par les intervalles de la forme $[-\infty, b]$.

Démonstration. Par union dénombrable, $\mathcal{B}(\overline{\mathbb{R}})$ contient les intervalles du type $[-\infty, b[$, donc les intervalles ouverts de \mathbb{R} $]a, b[= [-\infty, b] \setminus [-\infty, a]$. Cette tribu contient également les $]b, +\infty] = [-\infty, b]^c$. On a montré que la tribu engendrée par les $[-\infty, b]$ contient les intervalles du type $[-\infty, a[$, $]a, c[$, et $]c, +\infty]$, elle contient donc tous les ouverts de \mathbb{R} par union dénombrable. \square

Tribus et applications

Nous terminons cette section par des premières propriétés impliquant des applications entre ensembles. Dans ce qui suit f est une application de X dans X' . Si X' est muni d'une tribu \mathcal{A}' , on montre que l'image réciproque de \mathcal{A}' est une tribu sur X . Si X est muni d'une tribu \mathcal{A} , on peut vérifier que l'image de \mathcal{A} par f n'est pas en général une tribu sur X' . On définit ci-dessous une notion qui permet de pousser une tribu vers l'avant en utilisant la réciproque de f , il s'agit de la notion de *tribu image*, qui elle est bien une tribu sur l'espace d'arrivée. Cette notion s'étendra directement aux mesures, que l'on peut voir comme une distribution de masse sur un ensemble, si f est vu comme une application de transport, la mesure image correspond à la distribution des masses transportées.

Proposition III.2.9. (Image réciproque d'une tribu (•))

Soit f une application d'un ensemble X vers un ensemble X' muni d'une tribu \mathcal{A}' . L'image réciproque de \mathcal{A}' par f , c'est-à-dire la famille \mathcal{A} des parties A de X qui s'écrivent

$$A = f^{-1}(A') = \{x \in X, f(x) \in A'\},$$

avec $A' \in \mathcal{A}'$, est une tribu sur X .

Démonstration. On a $\emptyset = f^{-1}(\emptyset)$. Par ailleurs, pour tout $A' \in \mathcal{A}'$,

$$f^{-1}(A')^c = \{x \in X, f(x) \notin A'\} = \{x \in X, f(x) \in (A')^c\} = f^{-1}((A')^c) \in \mathcal{A} \text{ car } (A')^c \in \mathcal{A}'$$

Enfin, pour toute collection (A'_n) de \mathcal{A}' , on a

$$\bigcup_{n \in \mathbb{N}} f^{-1}(A'_n) = f^{-1} \left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A'_n \right) \text{ avec } \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A'_n \in \mathcal{A}',$$

qui appartient bien à \mathcal{A} . \square

L'image directe d'une tribu par une application n'est en général pas une tribu, comme on peut s'en convaincre en considérant par exemple une application constante vers un ensemble de cardinal ≥ 2 . On peut en revanche pousser en avant une tribu par une application pour obtenir une tribu, alors appelée *tribu image*, comme exprimé par la proposition suivante.

Proposition III.2.10. (Tribu image)

Soit f une application de X dans X' , et \mathcal{A} une tribu sur X . La collection de parties

$$\mathcal{A}' = f_{\#}\mathcal{A} = \{A' \subset X', f^{-1}(A') \in \mathcal{A}\}$$

est une tribu sur X' , appelée tribu-image de \mathcal{A} par f .

Démonstration. On a $f^{-1}(\emptyset) = \emptyset \in \mathcal{A}$ et $f^{-1}(X') = X \in \mathcal{A}$. Par ailleurs, si $A' \in \mathcal{A}'$,

$$f^{-1}(A'^c) = (f^{-1}(A'))^c \in \mathcal{A},$$

d'où $A'^c \in \mathcal{A}'$. Enfin, pour toute famille (A'_n) de \mathcal{A}' ,

$$f^{-1}\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} (A'_n)\right) = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} f^{-1}(A'_n) \in \mathcal{A},$$

d'où l'on déduit que l'union est dans \mathcal{A} . □

Exercice III.2.4. Soit $f : X \rightarrow X'$ une application constante et \mathcal{A} une tribu sur X . Identifier

$$f_{\#}\mathcal{A} = \{A' \subset X', f^{-1}(A') \in \mathcal{A}\}.$$

Si maintenant \mathcal{A}' est une tribu sur X' , identifier $f^{-1}(\mathcal{A}')$.

(Correction page 179)

III.2.2 Applications mesurables

Définition III.2.11. (Application mesurable (•))

Soit f une application d'un espace ensemble X vers un ensemble X' . On suppose X et X' munis de tribus \mathcal{A} et \mathcal{A}' , respectivement. On dit que f est mesurable⁶ de (X, \mathcal{A}) vers (X', \mathcal{A}') si l'image réciproque de toute partie de \mathcal{A}' est dans \mathcal{A} :

$$\forall A' \in \mathcal{A}', f^{-1}(A') \in \mathcal{A}.$$

On notera que, par définition, une application f de X dans (X', \mathcal{A}') est toujours mesurable, si l'on munit l'espace de départ de la tribu $f^{-1}(\mathcal{A}')$. Cette propriété est d'un intérêt limité du fait que la tribu sur l'ensemble de départ dépend de l'application.

Exercice III.2.5. Soit f une application de X dans X' .

Si l'on se donne une tribu \mathcal{A}' sur X , montrer que $f^{-1}(\mathcal{A})$ est la plus petite tribu sur X telle que f soit mesurable, c'est-à-dire que, si f est $\mathcal{A} - \mathcal{A}'$ mesurable, alors \mathcal{A} contient $f^{-1}(\mathcal{A})$.

Si l'on se donne maintenant une tribu \mathcal{A} sur X , montrer que $f_{\#}\mathcal{A}$ est la plus grande tribu sur X' telle que f soit mesurable, c'est-à-dire que, si f est $\mathcal{A} - \mathcal{A}'$ mesurable, alors \mathcal{A}' est contenue dans $f_{\#}(\mathcal{A})$. (Correction page 179)

Exercice III.2.6. Montrer qu'une application constante (qui envoie tous les éléments de l'espace de départ vers un même point de l'espace d'arrivée), est toujours mesurable. (Correction page 180)

Exercice III.2.7. Soit Id l'application identité de (X, \mathcal{A}) vers (X, \mathcal{A}') . A quelle condition cette application est-elle mesurable ? (Correction page 180)

Proposition III.2.12. (Critère de mesurabilité d'une application (••))

Soit f une application de X (muni d'une tribu \mathcal{A}) vers X' (muni d'une tribu \mathcal{A}'). On suppose que la tribu \mathcal{A}' de l'espace d'arrivée est engendrée par $\mathcal{C}' \subset \mathcal{P}(X')$.

L'application f est mesurable si et seulement si $f^{-1}(C') \in \mathcal{A}$ pour tout $C' \in \mathcal{C}'$.

6. On pourra écrire que f est $\mathcal{A} - \mathcal{A}'$ mesurable, ou simplement mesurable s'il n'y a pas d'ambiguïté sur les tribus qui structurent X et X' .

Démonstration. On introduit

$$\mathcal{B}' = \{B' \in \mathcal{A}' , f^{-1}(B') \in \mathcal{A}\} = f_{\#}\mathcal{A} \cap \mathcal{A}'.$$

Il s'agit d'une tribu comme intersection de tribus (la mesure image $f_{\#}\mathcal{A}$ est une tribu d'après la proposition III.2.10. Et cette tribu contient \mathcal{C}' par hypothèse, elle contient donc la tribu engendrée par \mathcal{C}' , c'est à dire \mathcal{A}' . \square

Exercice III.2.8. Soit (X, \mathcal{A}) et (X', \mathcal{A}') deux espaces mesurables. Décrire l'ensemble des applications mesurables de X vers X' , dans le cas où X est muni de la tribu grossière $\mathcal{A} = \{\emptyset, X\}$. Même question si X est muni de la tribu discrète $\mathcal{A} = \mathcal{P}(X)$. Que peut-on dire si X' est muni de la tribu grossière ? De la tribu discrète ? (Correction page 180)

III.2.3 Classes monotones

Définition III.2.13. (Classe monotone (\bullet))

Soit X un ensemble. On appelle classe monotone (ou λ -système) sur X un ensemble \mathcal{D} de parties de X qui vérifie les propriétés suivantes :

- (i) $X \in \mathcal{D}$,
- (ii) $A, B \in \mathcal{D}, A \subset B \implies B \setminus A \in \mathcal{D}$,
- (iii) si (A_n) est une suite croissante d'éléments de \mathcal{D} ($A_n \subset A_{n+1}$ pour tout n), alors

$$\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{D}.$$

Proposition III.2.14. Toute tribu sur X est une classe monotone.

Démonstration. Soit \mathcal{A} une tribu sur X . On a par définition $X = \emptyset^c \in \mathcal{A}$. Pour tous A, B dans \mathcal{D} , avec $A \subset B$, on a $B \setminus A = B \cap A^c \in \mathcal{A}$. Enfin toute réunion dénombrable d'éléments de \mathcal{A} est dans \mathcal{A} . \square

Proposition III.2.15. Toute intersection de classes monotones est une classe monotone.

Démonstration. C'est une conséquence immédiate de la définition. \square

Définition III.2.16. (Classe monotone engendrée par un ensemble de parties (\bullet))

La propriété étant stable par intersection, et l'ensemble $\mathcal{P}(X)$ de toutes les parties étant une classe monotone, on peut définir la notion de classe monotone engendrée par un ensemble \mathcal{C} de parties, définie comme l'intersection de toutes les classes monotones qui contiennent \mathcal{C} .

Définition III.2.17. (π -système (\bullet))

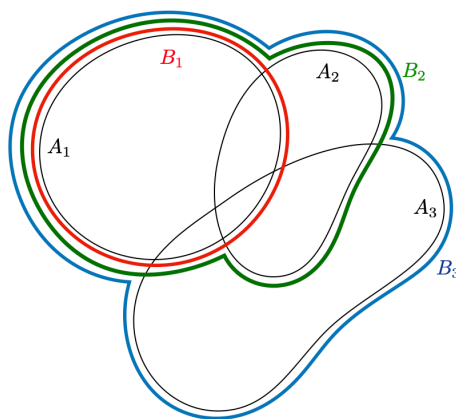
On appelle π -système sur un ensemble X un sous-ensemble \mathcal{C} non vide de parties de X stable par intersection finie :

$$A \in \mathcal{C}, B \in \mathcal{C} \implies A \cap B \in \mathcal{C}.$$

Remarque III.2.18. Certains auteurs ajoutent la condition qu'un π -système doit contenir X .

Exemples III.2.2. Les ensembles de parties suivants sont des π -systèmes :

1. L'ensemble $\mathcal{P}(X)$ des parties de X .
2. L'ensemble des ouverts d'un espace topologique.
3. L'ensemble des fermés d'un espace topologique.

FIGURE III.2.1 – Construction de la suite croissante B_1, B_2, \dots

4. La famille $\{]-\infty, c], c \in \mathbb{R}\}$ de parties de \mathbb{R} .
5. L'ensemble d'intervalles ouverts $\{]a, b[, -\infty \leq a_i \leq b_i \leq +\infty\}$.
6. Les rectangles ouverts de \mathbb{R}^2 , de type $]a_1, a_2[\times]b_1, b_2[$, avec $-\infty \leq a_i \leq b_i \leq +\infty, i = 1, 2$.
7. Les rectangles fermés.
8. Les rectangles semi-ouverts semi-fermé de \mathbb{R}^2 , de type $[a_1, a_2[\times]b_1, b_2[$, avec $-\infty \leq a_i \leq b_i \leq +\infty, i = 1, 2$.
9. Tout ensemble de singletons : pour $A \subset X, \{\{x\}, x \in A\}$ auquel on rajoute la partie vide est un π -système.

Proposition III.2.19. (•) Soit \mathcal{D} une classe monotone stable par intersection finie (i.e. \mathcal{D} est aussi un π -système). Alors \mathcal{D} est une tribu.

Démonstration. On a $\emptyset = X \setminus X \in \mathcal{D}$ et, pour tout $A \in \mathcal{D}$, $A^c = X \setminus A \in \mathcal{D}$. Considérons maintenant une famille (A_n) d'éléments de \mathcal{D} . Il s'agit de montrer que l'union des A_n est dans \mathcal{D} . On pose $B_0 = A_0$ et, considérant que B_n est construit, et qu'il appartient à \mathcal{D} , on définit B_{n+1} comme $B_n \cup A_{n+1} = A_0 \cup A_1 \cup \dots \cup A_{n+1}$ (voir figure III.2.1). Montrons par récurrence que $B_{n+1} \in \mathcal{D}$. Supposons B_n dans \mathcal{D} . On a

$$B_{n+1} = B_n \cup A_{n+1} = \left(\underbrace{B_n^c \cap A_{n+1}^c}_{\in \mathcal{D}} \right)^c$$

qui est dans \mathcal{D} comme complémentaire d'un élément de \mathcal{D} .

La suite (B_n) d'éléments de \mathcal{D} , est croissante par construction, d'où $\cup B_n \in \mathcal{D}$, et cette union s'identifie par construction à l'union des A_n . La famille \mathcal{D} est donc bien une tribu. \square

Proposition III.2.20. (Lemme de classe monotone)

(••) Soit \mathcal{C} un π -système sur l'ensemble X . La classe monotone \mathcal{D} engendrée par \mathcal{C} est égale à la tribu $\mathcal{A} = \sigma(\mathcal{C})$ engendrée par \mathcal{C} .

Démonstration. La tribu \mathcal{A} contient \mathcal{C} , et c'est une classe monotone (proposition III.2.14), elle contient donc \mathcal{D} qui est la plus petite classe monotone contenant \mathcal{C} . Pour montrer l'inclusion inverse, nous allons montrer que \mathcal{D} est une tribu (qui alors contient nécessairement \mathcal{A} , qui est la plus petite). D'après la

proposition III.2.19, il suffit de montrer que \mathcal{D} est un π -système, i.e. qu'elle est stable par intersection finie. On considère dans un premier temps

$$\mathcal{D}' = \{A \in \mathcal{D}, A \cap C \in \mathcal{D} \quad \forall C \in \mathcal{C}\}.$$

Nous allons montrer que \mathcal{D}' est une classe monotone qui contient \mathcal{C} . Comme elle est incluse dans \mathcal{D} par définition, nous en déduirons qu'elle s'identifie à \mathcal{D} .

Cet ensemble de parties contient de façon évidente le π -système \mathcal{C} . Par ailleurs, pour tous $A, B \in \mathcal{D}'$, $A \subset B$, on a

$$(B \setminus A) \cap C = \underbrace{(B \cap C)}_{\in \mathcal{D}} \setminus \underbrace{(A \cap C)}_{\in \mathcal{D}} \in \mathcal{D}.$$

Montrons que \mathcal{D}' est également stable par union croissante. Pour toute suite croissante (A_n) dans \mathcal{D}' , on a

$$\left(\bigcup A_n\right) \cap C = \bigcup \left(\underbrace{A_n \cap C}_{\in \mathcal{D}}\right) \in \mathcal{D}.$$

L'ensemble \mathcal{D}' est donc une classe monotone, qui contient \mathcal{C} , et qui est contenue dans la classe monotone \mathcal{D} engendrée par \mathcal{C} , elle s'identifie donc à \mathcal{D} . On a ainsi montré que, pour tout $A \in \mathcal{D}$, $C \in \mathcal{C}$, $A \cap C \in \mathcal{D}$. Il reste à montrer la stabilité par intersection finie, et pas seulement avec les éléments de \mathcal{C} . Pour cela on introduit

$$\mathcal{D}'' = \{A \in \mathcal{D}, A \cap A' \in \mathcal{D} \quad \forall A' \in \mathcal{D}\}.$$

Cet ensemble contient \mathcal{C} comme on vient de le montrer, et c'est une classe monotone (la démonstration est la même que précédemment) contenue dans \mathcal{D} , elle s'identifie donc à \mathcal{D} . On a ainsi montré que \mathcal{D} est un π -système. Comme c'est aussi une classe monotone, c'est une tribu d'après la proposition III.2.14, qui contient \mathcal{C} , elle contient donc $\mathcal{A} = \sigma(\mathcal{C})$, ce qui termine la preuve. \square

Ce lemme est très utile pour montrer que deux mesures (voir section III.3 ci-après) définies sur une même tribu sont égales. Si cette tribu commune est engendrée par un π -système, il suffira de montrer que les deux mesures s'identifient sur ce π -système (voir proposition III.3.12).

III.3 Mesures

Définition III.3.1. (•) Soit X un ensemble, et \mathcal{A} une tribu sur X . On appelle mesure une application de \mathcal{A} dans $[0, +\infty]$ telle que

- (i) $\mu(\emptyset) = 0$,
- (ii) si (A_n) est une collection dénombrable d'éléments de \mathcal{A} deux à deux disjoints, alors

$$\mu\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) = \sum_{n=0}^{+\infty} \mu(A_n).$$

Le triplet (X, \mathcal{A}, μ) (ensemble X muni d'une tribu \mathcal{A} et d'une mesure associée) est appelé *espace mesuré*.

On dit que la mesure est *finie* si $\mu(X) < +\infty$.

On dit que la mesure est σ -*finie* si X est réunion dénombrable d'éléments de \mathcal{A} de mesure finie.

Remarque III.3.2. On notera que le (i) de la définition n'est pas une équivalence, comme l'axiome de séparation pour une distance : la mesure d'un ensemble non vide peut être nulle. On verra en particulier que les singletons pour la mesure de Lebesgue sont de mesure nulle, ainsi que d'autres ensembles a priori beaucoup plus "gros", par exemple l'ensemble triadique de Cantor, qui est non dénombrable (voir exercice III.6.13, page 90). Noter par ailleurs que la mesure identiquement nulle est bien une mesure.

Exemples III.3.1. (•) Nous donnons ici quelques exemples de mesures associées à un ensemble X quelconque.

1. (Mesure de comptage). Soit X un ensemble et \mathcal{A} une tribu sur X . On définit $\mu(A)$ comme le cardinal de A .
2. (Masse ponctuelle) Soit X un ensemble, \mathcal{A} une tribu sur X , et $x \in X$. L'application δ_x qui à $A \in \mathcal{A}$ associe 1 si $x \in A$, 0 sinon, est une mesure appelée masse ponctuelle en x .
3. Toute combinaison positive de masses ponctuelles

$$\mu = \sum_{i=1}^n \alpha_i \delta_{x_i}, \quad \alpha_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, n$$

est également une mesure.

4. (Mesure grossière) Soit X un ensemble de cardinal ≥ 2 , et \mathcal{A} une tribu sur X . On pose $\mu(\emptyset) = 0$ et $\mu(A) = +\infty$ dès que $A \neq \emptyset$. Il s'agit d'une manière quelque peu grossière (d'où le nom), binaire, d'appréhender le monde, en distinguant deux types d'ensembles (disons des zones de l'espace physique pour fixer les idées) : l'ensemble vide, de volume nul, et tout ensemble non vide, auquel on attribuerait par convention une quantité infinie. Cette mesure extérieure ne distingue en quelque sorte que le "rien" et le "quelque chose". On peut associer à cette mesure extérieure une addition⁷ primitive basée sur :

$$\begin{aligned} \text{rien} + \text{rien} &= \text{rien}, & \text{rien} + \text{quelque chose} &= \text{quelque chose}, \text{ et} \\ \text{quelque chose} + \text{quelque chose} &= \text{quelque chose}. \end{aligned}$$

Proposition III.3.3. (Monotonie (•))

Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré. La mesure μ est *monotone*, c'est-à-dire que si $A \in \mathcal{A}$ est inclus dans $B \in \mathcal{A}$, alors la mesure de A est plus petite que celle de B :

$$\forall A, B \in \mathcal{A}, \quad A \subset B \implies \mu(A) \leq \mu(B).$$

Si la mesure de A est finie, on a de plus $\mu(B \setminus A) = \mu(B) - \mu(A)$.

Démonstration. On écrit simplement B comme réunion disjointe $B = A \cup (B \setminus A)$, qui implique, d'après la définition,

$$\mu(B) = \mu(A) + \mu(B \setminus A),$$

d'où les propriétés annoncées. □

Proposition III.3.4. Soit μ une mesure σ – finie. Il existe une partition (B_n) de X constituée d'ensembles mesurables et de mesures finies.

Démonstration. Par définition X s'écrit comme réunion d'ensembles A_n de mesures finies (non nécessairement disjoints). On prend $B_0 = A_0$, et l'on définit B_n comme $A_n \setminus (A_{n-1} \cup \dots \cup A_0)$. On a

$$B_n = A_n \setminus \bigcup_{k=0}^{n-1} A_k \subset A_n,$$

d'où

$$\mu(B_n) \leq \mu(A_n) < +\infty,$$

et, par construction, (B_n) est une partition⁸ de X . □

7. Il s'agit bien d'une loi de composition interne sur l'ensemble à deux éléments {'rien', 'quelque chose'}, que l'on peut obtenir en quotientant X par la relation d'équivalence basée sur la notion d'être vide ou pas. Pour les lecteurs sensibles au plaisir de désigner des choses simples par des termes abscons, rajoutons que cette loi est associative, commutative, possède un élément neutre ('rien'), et munit donc notre petit univers à deux éléments d'une structure de *magma associatif unifié abélien* (sic).

8. A strictement parler, une partition est censée ne contenir que des parties non vides, on se ramène à cette situation en ôtant de la liste les indices n tels que $B_n = \emptyset$.

Proposition III.3.5. (Sous-additivité (•))

Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré, et (A_n) une suite dans \mathcal{A} . On a

$$\mu \left(\bigcup_{n=0}^{+\infty} A_n \right) \leq \sum_{n=0}^{+\infty} \mu(A_n).$$

Démonstration. La démonstration est basée, comme dans la démonstration de la proposition III.3.4 ci-dessus, sur la construction d'une suite (B_n) d'éléments disjoints de \mathcal{A} , telle que l'union des n premiers termes s'identifie à l'union des n premiers A_k . On pose $B_0 = A_0$ et l'on construit par récurrence

$$B_n = A_n \setminus \left(\bigcup_{k=0}^{n-1} A_k \right) = A_n \cap A_1^c \cap \dots \cap A_{n-1}^c,$$

qui appartient bien à la tribu \mathcal{A} , et qui est tel que $\mu(B_n) \leq \mu(A_n)$. On a donc

$$\mu \left(\bigcup_{n=0}^{+\infty} A_n \right) = \mu \left(\bigcup_{n=0}^{+\infty} B_n \right) = \sum_{n=0}^{+\infty} \mu(B_n) \leq \sum_{n=0}^{+\infty} \mu(A_n),$$

qui est l'inégalité annoncée. \square

Proposition III.3.6. Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré, et (A_n) une suite de parties de \mathcal{A} , croissante pour l'inclusion. On a alors

$$\mu \left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \right) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \mu(A_n) \in [0, +\infty].$$

Démonstration. On construit la même suite B_n en posant $B_0 = A_0$, et $B_n = A_n \setminus A_{n-1}$. Les B_n sont disjoints par construction, et A_n est l'union des B_j pour $j \leq n$. On a donc

$$\begin{aligned} \mu \left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \right) &= \mu \left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} B_n \right) = \sum_{j=0}^{+\infty} \mu(B_j) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{j=0}^n \mu(B_j) \\ &= \lim_{n \rightarrow +\infty} \mu \left(\bigcup_{j=0}^n B_j \right) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \mu(A_n). \end{aligned}$$

qui termine la preuve. \square

Définition III.3.7. (Ensemble négligeable, mesure complète (•))

Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré. On dit que l'ensemble $N \subset X$ est *négligeable* s'il est inclus dans une partie $A \in \mathcal{A}$ de mesure nulle. On dit qu'une propriété est vérifiée *μ -presque partout*, ou qu'elle est vérifiée pour *μ -presque tout x* , si elle est vérifiée en dehors d'un ensemble négligeable. On dit que la mesure μ est *complète* si tous les ensembles négligeables sont dans \mathcal{A} .

Remarque III.3.8. Une propriété vérifiée presque partout est en particulier vérifiée sur un membre de la tribu dont le complémentaire est de mesure nulle. En effet, elle est vérifiée en dehors d'un ensemble négligeable N inclus dans $A \in \mathcal{A}$ de mesure nulle. Elle est donc a fortiori vérifiée sur $A^c \in \mathcal{A}$.

Définition III.3.9. (Ensembles de mesure pleine (•))

Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré. On dit que $B \in \mathcal{A}$ est de mesure pleine si, pour tout $A \in \mathcal{A}$, $\mu(A \cap B) = \mu(A)$.

Définition III.3.10. (Absolue continuité d'une mesure par rapport à une autre (••))

Soit (X, \mathcal{A}) un espace mesurable, λ et μ deux mesures sur \mathcal{A} . On dit que μ est *absolument continue* par rapport à λ , et l'on écrit $\mu \ll \lambda$, si pour tout $A \in \mathcal{A}$ tel que $\lambda(A) = 0$, on a aussi $\mu(A) = 0$.

Remarque III.3.11. Cette propriété qui caractérise d'une certaine manière le positionnement relatif de deux mesures joue un rôle essentiel dans les applications. La situation typique est la suivante : on a une mesure définie sur un espace mesurable, notée λ (il s'agira en général de la mesure de Lebesgue sur \mathbb{R} ou \mathbb{R}^d qui va être définie dans la section suivante) qui, pour reprendre l'esprit des remarques introductives à cette partie, *tapisse* en quelque sorte l'espace sous-jacent, en permettant d'affecter à une zone son volume (que l'on peut concevoir comme une capacité à accueillir de la matière). Cette mesure sera en général *statique*, au sens où elle est définie une fois pour toutes. On fera vivre sur ce même espace d'autres mesures, que nous appellerons μ , qui représentent typiquement une distribution de matière, susceptible d'évoluer au cours du temps. Dire que l'on a absolue continuité de μ par rapport à λ signifie que l'on n'a pas de concentration : une zone de volume nul ne peut contenir qu'une masse elle-même nulle. Dans cette situation, le théorème de Radon-Nykodim (qui dépasse le cadre de ce cours sous sa forme présente) assurera que l'on peut représenter la mesure μ par une densité adossée à la mesure λ , ce qui permet de représenter une distribution de matière comme une *fonction*.

La proposition suivante donne un critère très utile en pratique d'égalité entre deux mesures, elle jouera un rôle essentiel dans la construction des mesures-produits.

Proposition III.3.12. (••) Soit (X, \mathcal{A}) un espace mesurable, et \mathcal{C} un π -système sur X (définition III.2.17), qui engendre \mathcal{A} . Soient μ et ν deux mesures finies sur \mathcal{A} , telles que $\mu(X) = \nu(X)$ et $\mu(C) = \nu(C)$ pour tout C dans \mathcal{C} . Alors $\mu = \nu$.

Démonstration. On considère l'ensemble \mathcal{D} de parties défini par

$$\mathcal{D} = \{A \in \mathcal{A}, \mu(A) = \nu(A)\}.$$

On souhaite montrer que $\mathcal{D} = \mathcal{A}$. Il suffit pour cela de montrer que \mathcal{D} est une classe monotone qui contient \mathcal{C} . En effet, cela impliquera que \mathcal{D} contient la classe monotone engendrée par \mathcal{C} qui, d'après la proposition III.2.20, est la tribu engendrée par \mathcal{C} .

On a par hypothèse $X \in \mathcal{D}$. Pour tous A, B dans \mathcal{D} , avec $A \subset B$, on a

$$\mu(B \setminus A) = \mu(B) - \mu(A) = \nu(B) - \nu(A) = \nu(B \setminus A),$$

d'où $B \setminus A \in \mathcal{D}$. Pour toute suite croissante dans \mathcal{D} , on a, d'après la proposition III.3.6 ;

$$\mu\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \mu(A_n) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \nu(A_n) = \nu\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right).$$

Nous avons donc montré que \mathcal{D} est une classe monotone. Comme évoqué ci-dessus, contenant \mathcal{C} , elle contient la classe monotone engendrée par \mathcal{C} , qui est la tribu engendrée par \mathcal{C} , c'est-à-dire \mathcal{A} . On a donc $\mu(A) = \nu(A)$ pour tout $A \in \mathcal{A}$, les mesures sont donc les mêmes. \square

Corollaire III.3.13. On se place dans les hypothèses de la proposition précédente, en ne supposant plus les mesures finies. On suppose en revanche qu'il existe une suite croissante (C_n) d'éléments de \mathcal{C} , dont l'union est égale à X , et telle que $\mu(C_n) < +\infty$ et $\nu(C_n) < +\infty$ pour tout n . Alors $\mu = \nu$.

Démonstration. Pour tout n on définit

$$\mu_n(A) = \mu(A \cap C_n), \quad \nu_n(A) = \nu(A \cap C_n),$$

D'après la proposition III.3.12, on a $\mu_n = \nu_n$ pour tout n , d'où, pour tout $A \in \mathcal{A}$,

$$\mu(A) = \lim_n \mu_n(A) = \lim_n \nu_n(A) = \nu(A),$$

qui exprime l'identité des mesures μ et ν . \square

Noter que les hypothèses de la proposition précédente imposent que μ et ν soient σ -finies, mais l'on demande en outre que la famille de parties de mesures finies qui recouvre X puisse être composée d'éléments du π -système \mathcal{C} .

III.4 Mesures extérieures

Cette section présente la notion de mesure extérieure, qui correspond à une mesure à laquelle on aurait ôté la condition de σ -additivité, remplacée par une notion affaiblie de σ -sous-additivité. Cette notion constituera une étape essentielle dans la construction de la mesure de Lebesgue. Comme on le verra, il est assez facile de construire explicitement une telle mesure extérieure définie sur l'ensemble des parties de \mathbb{R} ou \mathbb{R}^d , et c'est en dégrossissant cette mesure extérieure que nous aboutirons à la mesure de Lebesgue.

III.4.1 Définitions, premières propriétés

Définition III.4.1. (•) Soit X un ensemble. On appelle *mesure extérieure* sur X une application μ^* de $\mathcal{P}(X)$ dans $[0, +\infty]$ telle que

- (i) $\mu^*(\emptyset) = 0$,
- (ii) si $A \subset B$ alors $\mu^*(A) \leq \mu^*(B)$,
- (iii) si (A_n) est une collection de parties de X , alors

$$\mu^*\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) \leq \sum_{n=0}^{+\infty} \mu^*(A_n).$$

Exemples III.4.1. Nous donnons ici quelques exemples de mesures extérieures associées à un ensemble X quelconque. Précisons en premier lieu que toute mesure définie sur la tribu constituée de toutes les parties d'un ensemble est une mesure extérieure, du fait que la monotonie est une propriété des mesures (voir proposition III.3.3), ainsi que la sous-additivité (voir proposition III.3.5). La mesure de comptage, ou toute masse ponctuelle (voir exemples III.3.1), si on les définit sur la tribu discrète $\mathcal{P}(X)$, sont donc des mesures extérieures.

Autres exemples :

1. Soit X un ensemble. On pose $\mu^*(\emptyset) = 0$ et $\mu^*(A) = 1$ pour tout $A \in \mathcal{P}(X)$, $A \neq \emptyset$ (voir exercice III.4.1).
2. Soit X un ensemble. Pour tout $A \in \mathcal{P}(X)$, on pose $\mu^*(A) = 0$ si A est dénombrable, et $\mu^*(A) = 1$ dès que A est non dénombrable.

Une mesure extérieure n'est pas en général une mesure sur $\mathcal{P}(X)$. Nous verrons néanmoins que sa restriction à une sous-partie de $\mathcal{P}(X)$ est bien une mesure. Cette sous-partie est constituée des ensembles appelés μ^* -mesurables. Il s'agit d'ensemble qui, avec leur complémentaire, constituent une partition de l'espace complet vis-à-vis de laquelle la mesure extérieure est *additive*, au sens précisé ci-dessous.

Définition III.4.2. (Ensembles mesurables pour une mesure extérieure (•))

Soit X un ensemble, et μ^* une mesure extérieure sur X . On dit que B est μ^* -mesurable si, pour tout $A \subset X$, on a

$$\mu^*(A) = \mu^*(A \cap B) + \mu^*(A \cap B^c). \quad (\text{III.4.1})$$

Du fait de la sous-additivité de μ^* , l'inégalité

$$\mu^*(A) \geq \mu^*(A \cap B) + \mu^*(A \cap B^c)$$

pour tout A suffit pour assurer la μ^* -mesurabilité de B .

Exercice III.4.1. Soit X un ensemble non vide et μ^* l'application de $\mathcal{P}(X)$ dans \mathbb{R}_+ définie par $\mu^*(\emptyset) = 0$ et $\mu^*(A) = 1$ pour tout $A \in \mathcal{P}(X)$, différent de \emptyset . Montrer que μ^* est une mesure extérieure. À quelles

conditions μ^* est-elle une mesure? Quels sont les parties de X mesurables pour μ^* ? (Correction page 180)

Nous verrons que, si l'on s'en tient à la définition, il se peut qu'une mesure extérieure admette très peu d'ensembles mesurables (voir exercice III.4.1 ci-après). La proposition suivante établit que, dans tous les cas, les ensembles *très petits* (de mesure extérieure nulle), ou *très gros* (i.e. de complémentaire très petit), sont mesurables au sens de la définition précédente.

Proposition III.4.3. (•) Soit X un ensemble et μ^* une mesure extérieure sur X (définition III.4.2). Tout $B \subset X$ tel que $\mu^*(B) = 0$ ou $\mu^*(B^c) = 0$ est μ^* -mesurable.

Démonstration. Soit B une telle partie. Comme indiqué dans la définition, il suffit de vérifier que, pour tout $A \subset X$, $\mu^*(A) \geq \mu^*(A \cap B) + \mu^*(A \cap B^c)$. Or, si $\mu^*(B) = 0$, alors $\mu^*(A \cap B) \leq \mu^*(B) = 0$ par monotonie, et $\mu^*(A \cap B^c) \leq \mu^*(A)$ par monotonie également. Le cas $\mu^*(B^c) = 0$ se traite de la même manière. \square

III.4.2 D'une mesure extérieure à une mesure

Le théorème suivant constitue un outil très général pour construire des couples tribus - mesures à partir de la donnée d'une mesure extérieure. Nous l'utiliserons pour construire la mesure de Lebesgue à partir de sa version extérieure (définie par la proposition III.4.6 ci-après).

Théorème III.4.4. (••) Soit X un ensemble et μ^* une mesure extérieure sur X (définition III.4.2). On note \mathcal{A}_{μ^*} la collection des parties μ^* -mesurables (selon la définition III.4.2).

Alors \mathcal{A}_{μ^*} est une tribu, et la restriction de μ^* à \mathcal{A}_{μ^*} est une mesure.

Démonstration. (•••) Montrons dans un premier temps que \mathcal{A}_{μ^*} est une algèbre, c'est-à-dire qu'elle vérifie les conditions de la définition III.2.13, avec condition (iii) limitée aux collections finies. La proposition III.4.3 assure que \emptyset et X sont dans \mathcal{A}_{μ^*} . Par ailleurs l'identité (III.4.1) est inchangée si l'on échange les rôles de B et B^c , \mathcal{A}_{μ^*} est donc stable par complémentarité.

Montrons maintenant la stabilité par union. Soient B_1, B_2 deux parties de \mathcal{A}_{μ^*} (la démarche ci-dessous est illustrée par la figure III.4.1). Comme B_1 est μ^* -mesurable, on a, pour tout $A \subset X$,

$$\begin{aligned} \mu^*(A \cap (B_1 \cup B_2)) &= \mu^*(A \cap (B_1 \cup B_2) \cap B_1) + \mu^*(A \cap (B_1 \cup B_2) \cap B_1^c) \\ &= \mu^*(A \cap B_1) + \mu^*(A \cap B_1^c \cap B_2). \end{aligned}$$

On a donc, en utilisant $(B_1 \cup B_2)^c = B_1^c \cap B_2^c$ et la μ^* -mesurabilité de B_2 ,

$$\begin{aligned} &\mu^*(A \cap (B_1 \cup B_2)) + \mu^*(A \cap (B_1 \cup B_2)^c) \\ &= \mu^*(A \cap B_1) + \mu^*((A \cap B_1^c) \cap B_2) + \mu^*((A \cap B_1^c) \cap B_2^c) \\ &= \mu^*(A \cap B_1) + \mu^*(A \cap B_1^c) \end{aligned}$$

qui est égal à $\mu^*(A)$ du fait que $B_1 \in \mathcal{A}_{\mu^*}$. L'ensemble \mathcal{A}_{μ^*} est donc stable par unions finies, il s'agit bien d'une algèbre.

Pour montrer que c'est une tribu, il reste à montrer qu'elle est stable par union dénombrable. Considérons une suite (B_k) d'éléments de \mathcal{A}_{μ^*} , supposés deux à deux *disjoints*. Nous allons montrer par récurrence que, pour tout n , la partition finie (recouvrement de X par $n + 1$ parties disjointes)

$$B_1, B_2, \dots, B_n, \left(\bigcup_{k=1}^n B_k \right)^c$$

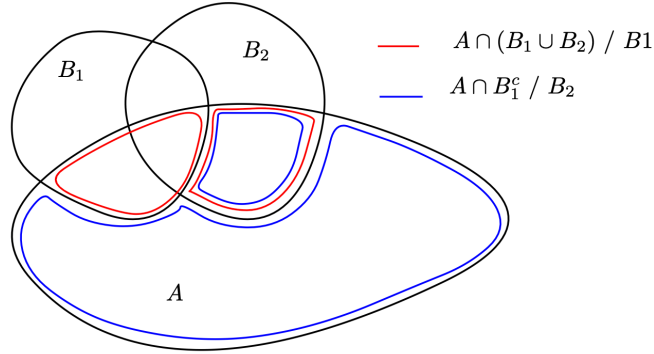


FIGURE III.4.1 – Mesurabilité de $B_1 \cup B_2$. La notation C / D de la légende indique que l'on écrit C comme l'union de $C \cap D$ et de $C \cap D^c$, où D est un ensemble mesurable.

respecte μ^* , au sens où, pour tout A

$$\mu^*(A) = \sum_{k=1}^n \mu^*(A \cap B_k) + \mu^* \left(A \cap \left(\bigcup_{k=1}^n B_k \right)^c \right).$$

Nous allons en fait démontrer par récurrence l'identité équivalente

$$\mu^*(A) = \sum_{k=1}^n \mu^*(A \cap B_k) + \mu^* \left(A \cap \left(\bigcap_{k=1}^n B_k^c \right) \right). \quad (\text{III.4.2})$$

L'identité pour $n = 1$ exprime simplement la μ^* -mesurabilité de B_1 . Supposons maintenant qu'elle est vraie jusqu'au rang n . L'appartenance de B_{n+1} à \mathcal{A}_{μ^*} implique

$$\begin{aligned} & \mu^* \left(A \cap \left(\bigcap_{k=1}^n B_k^c \right) \right) \\ &= \mu^* \left(A \cap \left(\bigcap_{k=1}^n B_k^c \right) \cap B_{n+1} \right) + \mu^* \left(A \cap \left(\bigcap_{k=1}^n B_k^c \right) \cap B_{n+1}^c \right) \\ &= \mu^*(A \cap B_{n+1}) + \mu^* \left(A \cap \left(\bigcap_{k=1}^{n+1} B_k^c \right) \right) \end{aligned}$$

qui établit (III.4.2). On remarque maintenant que, par monotonie, le second terme de (III.4.2) diminue (au sens large) si l'on remplace l'intersection finie par l'intersection de tous les B_k^c . On a donc, en faisant tendre n vers $+\infty$,

$$\mu^*(A) \geq \sum_{k=1}^{+\infty} \mu^*(A \cap B_k) + \mu^* \left(A \cap \left(\bigcap_{k=1}^{+\infty} B_k^c \right) \right), \quad (\text{III.4.3})$$

d'où, par σ -sous-additivité de μ^* ,

$$\mu^*(A) \geq \mu^* \left(A \cap \left(\bigcup_{k=1}^{+\infty} B_k \right) \right) + \mu^* \left(A \cap \left(\bigcup_{k=1}^{+\infty} B_k \right)^c \right),$$

qui est supérieur ou égal à $\mu^*(A)$ par sous-additivité. On a donc identité entre $\mu^*(A)$ et l'expression ci-dessus, pour tout A , ce qui prouve que l'union des B_k est dans \mathcal{A}_{μ^*} . On en déduit immédiatement

la stabilité par union dénombrable générale (sans le caractère disjoint deux à deux), en notant que l'union des B_k dans \mathcal{A}_{μ^*} peut s'écrire comme union d'ensembles disjoints

$$B_1, B_2 \cap B_1^c, B_3 \cap B_2^c \cap B_1^c, \dots, B_n \cap B_{n-1}^c \cap B_{n-2}^c \cap \dots \cap B_1^c, \dots$$

Nous avons ainsi démontré que \mathcal{A}_{μ^*} est une tribu.

Il reste à vérifier que la restriction de μ^* à \mathcal{A}_{μ^*} est bien une mesure. Il suffit pour cela de vérifier l'additivité dénombrable. Considérons une suite (B_k) d'éléments de \mathcal{A}_{μ^*} disjoints deux à deux. On écrit simplement l'inégalité (III.4.3) en prenant pour A l'union des B_k . Il vient

$$\mu^*(A) \geq \sum_{k=1}^{+\infty} \mu^*(B_k) + 0$$

qui est supérieur à $\mu^*(A)$ par sous-additivité, d'où l'identité entre les deux expressions. \square

Remarque III.4.5. Noter que ce théorème peut aboutir dans certains cas à un résultat très “pauvre” pour certaines mesures extérieures. Comme l'illustre l'exercice III.4.1, si la mesure extérieure ne présente pas de bonnes propriétés d'additivité, les seuls ensembles mesurables sont X et \emptyset .

III.4.3 Mesure de Lebesgue

La première étape dans la construction de la mesure de Lebesgue est la définition d'une mesure *extérieure* de Lebesgue, selon le principe décrit dans l'introduction : on sait la valeur que l'on veut à la longueur d'un intervalle, la longueur totale d'une réunion d'intervalles (avec possibles recouvrements) est supérieure à la somme des longueurs. On considère donc que la mesure d'un ensemble, telle que l'on souhaite la définir, est inférieure à la somme des longueurs des intervalles, pour tout recouvrement de l'ensemble. Ces considérations conduisent à la définition de ce que l'on appelle la mesure extérieure de Lebesgue, donnée par la proposition qui suit (la proposition établit que l'objet défini est bien une mesure extérieure au sens de la définition III.4.2).

Proposition III.4.6. (Mesure de Lebesgue extérieure sur \mathbb{R} (••))

Pour tout $A \subset \mathbb{R}$, on note C_A l'ensemble des suites d'intervalles ouverts dont l'union recouvre A :

$$C_A = \left\{ (]a_i, b_i[)_{i \in \mathbb{N}}, A \subset \bigcup_{i \in \mathbb{N}}]a_i, b_i[\right\}.$$

On autorise les intervalles à être vides (i.e. a_i peut être égal à b_i), ce qui revient à autoriser les collections finies. On définit alors $\lambda^* : \mathcal{P}(X) \longrightarrow [0, +\infty]$ par

$$\lambda^*(A) = \inf_{C_A} \left(\sum_i (b_i - a_i) \right). \quad (\text{III.4.4})$$

Cette application est une mesure extérieure, appelée *mesure extérieure de Lebesgue*, et elle attribue à tout intervalle sa longueur.

Démonstration. (•••) Montrons que λ^* vérifie les trois conditions de la définition III.4.2.

(i) En premier lieu, l'ensemble vide est recouvert par une réunion d'intervalles vides. On a donc $\lambda^*(\emptyset) = 0$.

(ii) Ensuite, si $A \subset B$, alors toute suite d'intervalles qui recouvre B recouvre aussi A , l'infimum de (III.4.4) qui définit $\lambda^*(A)$, porte donc sur un ensemble plus grand que celui associé à B , d'où $\lambda^*(A) \leq \lambda^*(B)$.

(iii) Il s'agit maintenant de démontrer la σ -sous-additivité. On considère une suite (A_n) de parties de X . Il s'agit de montrer que la mesure extérieure de l'union est inférieure à la somme des mesures. Remarquons tout d'abord que si la somme des mesures est infinie, alors l'inégalité est immédiatement vraie. On peut donc supposer que toutes les mesures sont finies. Pour tout $\varepsilon > 0$, il existe une collection $[a_i^n, b_i^n]$ qui réalise (III.4.4) à $\varepsilon/2^n$ près, i.e.

$$\sum (b_i^n - a_i^n) \leq \lambda^*(A_n) + \frac{\varepsilon}{2^n}.$$

L'union de toutes ces collections d'intervalles est elle-même une collection dénombrable d'intervalles ouverts, dont la longueur totale majore par définition la mesure de l'union des A_n . On a donc

$$\lambda^*\left(\bigcup A_n\right) \leq \sum_{n=0}^{+\infty} \left(\lambda^*(A_n) + \frac{\varepsilon}{2^n}\right) = \sum_{n=0}^{+\infty} \lambda^*(A_n) + 2\varepsilon,$$

pour tout ε , d'où la σ -sous-additivité.

Il reste à montrer que λ^* affecte aux intervalles (ouverts, fermés, ou mixtes) leur longueur. Considérons l'intervalle fermé $[a, b]$. Pour tout ε on peut recouvrir cet intervalle par $]a - \varepsilon, b + \varepsilon[$ et des intervalles vides, la quantité $\lambda^*(A)$ est donc majorée par une quantité arbitrairement proche de $b - a$, on a donc $\lambda^*([a, b]) \leq b - a$. Montrons l'inégalité inverse. On considère pour cela un recouvrement de $[a, b]$ par des intervalles ouverts. Comme $[a, b]$ est compact, on peut en extraire un recouvrement fini, que l'on note $(]a_i, b_i[)_{1 \leq i \leq n}$ (on suppose que l'on ne garde dans ce recouvrement que des intervalles utiles, i.e. qui rencontrent $]a, b[$). Il existe nécessairement i_1 tel que $a_{i_1} < a$ (sinon a ne serait pas couvert), et on a $a < b_{i_1}$ (les intervalles inutiles ont été exclus). Si $b_{i_1} > b$, l'intervalle recouvre $]a, b[$, sinon il existe nécessairement i_2 tel que $a_{i_2} < b_{i_1}$ (sinon $b_{i_1} \in]a, b[$ ne serait pas couvert). On construit ainsi une suite $]a_{i_k}, b_{i_k}[$, avec $a_{i_k} < b_{i_{k+1}}$. Comme la collection finie recouvre $]a, b[$, on finit par arriver à $b_{i_k} > b$, on arrête alors la construction et l'on note n le rang atteint (voir figure III.4.2). On a alors

$$\begin{aligned} b - a &\leq b_{i_n} - a_{i_1} = b_{i_n} - a_{i_n} + \underbrace{a_{i_n} - \cdots - a_{i_2}}_{\leq b_{i_{n-1}}} + \underbrace{a_{i_2} - a_{i_1}}_{\leq b_{i_1}} \\ &\leq b_{i_n} - a_{i_n} + \cdots + b_{i_2} - a_{i_2} + b_{i_1} - a_{i_1}, \end{aligned}$$

qui est inférieur ou égal à la longueur totale de la collection d'intervalles initiale (car on en a enlevé certains). On a donc $b - a \leq \lambda^*(A)$. Pour finir si l'on considère l'intervalle $]a, b[$, on peut encadrer (pour l'inclusion) cet intervalle par des intervalles fermés $[a + \varepsilon, b - \varepsilon]$ et $[a - \varepsilon, b + \varepsilon]$, dont la mesure tend vers $b - a$, on a donc également $\lambda^*([a, b]) = b - a$. Le raisonnement est analogue pour les intervalles de type $[a, b[$ et $]a, b]$. \square

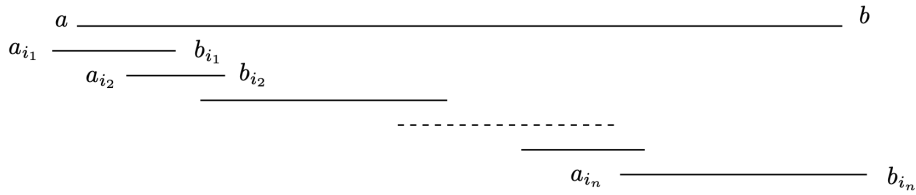


FIGURE III.4.2 – Recouvrement d'un intervalle

Définition III.4.7. (Mesure de Lebesgue extérieure sur \mathbb{R}^d (•••))

On définit de la même manière une mesure extérieure sur \mathbb{R}^d en remplaçant les collections d'intervalles par des collections de pavés

$$I_1 \times I_2 \times \cdots \times I_d = \{(x_1, \dots, x_d) \in \mathbb{R}^d, x_k \in I_k \text{ pour } k = 1, \dots, d\}$$

où les I_k sont des intervalles ouverts de \mathbb{R} . Le volume du pavé est le produit des longueurs des intervalles qui le définissent. On vérifie de façon analogue que l'application ainsi construite de $\mathcal{P}(\mathbb{R}^d)$ dans $[0, +\infty]$ est bien une mesure extérieure.

Proposition III.4.8. (••) Les parties boréliennes de \mathbb{R} sont mesurables pour la mesure extérieure de Lebesgue λ^* définie ci-dessus.

Démonstration. Montrons dans un premier temps que les intervalles de type $] -\infty, b]$ sont mesurables (au sens de la définition III.4.2). Soit B un tel intervalle. Il suffit de montrer que, pour tout $A \subset \mathbb{R}$,

$$\lambda^*(A) \geq \lambda^*(A \cap B) + \lambda^*(A \cap B^c). \quad (\text{III.4.5})$$

Si $\lambda^*(A) = +\infty$, l'inégalité est automatiquement vérifiée. On se place maintenant dans le cas $\lambda^*(A) < +\infty$. Soit $\varepsilon > 0$. Par définition de λ^* , il existe une collection $(]a_n, b_n[)$ d'intervalles (bornés) dont l'union contient A telle que

$$\lambda^*(A) \geq \sum (b_n - a_n) - \varepsilon.$$

Dans les lignes qui suivent, nous allons construire, à partir de ce recouvrement, des recouvrements de $A \cap B$ et $A \cap B^c$. Plus précisément, nous allons pour chaque intervalle $]a_n, b_n[$, construire deux intervalles ouverts contenant respectivement $]a_n, b_n[\cap B$ et $]a_n, b_n[\cap B^c$. La seule difficulté est que l'on ne peut pas prendre directement ces intersections comme intervalles ouverts, car certains sont du type $]a_n, b]$. L'idée est alors de recouvrir par un intervalle ouvert du type $]a_n, b + \varepsilon/2^n[$, de façon à ce que, même en sommant ensuite toutes les longueurs, on ne rajoute d'une quantité contrôlée par ε arbitrairement petit.

Plus précisément, pour tout n , l'intersection de $]a_n, b_n[$ avec $B =] -\infty, b]$ est soit vide (si $a_n \geq b$), soit un intervalle du type $]a_n, b]$ (si $a_n < b < b_n$), soit $]a_n, b_n[$ (si $b_n \leq b$). Dans le premier cas (intersection vide), on pose $a'_n = b'_n = 0$, de telle sorte de $]a'_n, b'_n[= \emptyset$. Dans le cas où il s'agit d'un intervalle du type $]a_n, b]$, ou si c'est l'intervalle $]a_n, b_n[$ lui-même, on pose $a'_n = a_n$ et $b'_n = b + \varepsilon/2^n$. De la même manière, l'intersection de $]a_n, b_n[$ avec $B^c =]b, +\infty[$ est soit vide (on pose alors $a''_n = b''_n = 0$), soit l'intervalle $]b, b_n[$, soit $]a_n, b_n[$. Dans ces deux derniers cas, on pose alors simplement $a''_n = \max(a_n, b)$, $b''_n = b_n$. Par construction (voir figure III.4.3), on a

$$b'_n - a'_n + b''_n - a''_n \leq b_n - a_n + \varepsilon/2^n.$$

L'union $]a'_n, b'_n[$ recouvre $A \cap B$, et l'union $]a''_n, b''_n[$ recouvre $A \cap B^c$. On a donc

$$\lambda^*(A \cap B) \leq \sum (b'_n - a'_n) \text{ et } \lambda^*(A \cap B^c) \leq \sum (b''_n - a''_n),$$

et ainsi

$$\lambda^*(A \cap B) + \lambda^*(A \cap B^c) \leq \sum (b'_n - a'_n) + \sum (b''_n - a''_n) \leq \sum (b_n - a_n) + 2\varepsilon \leq \lambda^*(A) + 3\varepsilon,$$

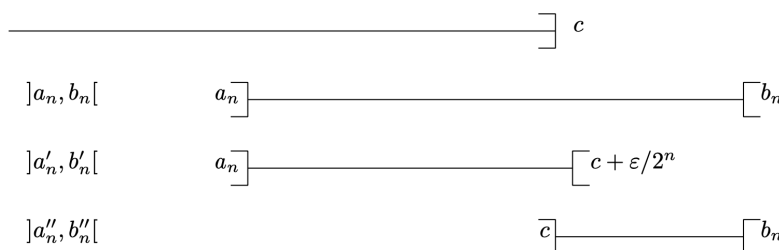
pour tout $\varepsilon > 0$, ce qui prouve l'inégalité (III.4.5). L'intervalle $] -\infty, b]$ est donc mesurable pour tout $b \in \mathbb{R}$.

D'après le théorème III.4.4, la famille des parties mesurables pour λ^* est une tribu, qui contient les $] -\infty, b]$ d'après ce que l'on vient de voir. Cette famille contient donc la tribu engendrée par ces intervalles, qui est la tribu borélienne d'après la proposition III.2.7. \square

Définition III.4.9. (Mesure de Lebesgue sur \mathbb{R} et \mathbb{R}^d (•))

On définit la mesure de Lebesgue λ comme la mesure construite, selon le théorème III.4.4, à partir de la mesure extérieure de Lebesgue λ^* définie par la proposition III.4.6. Cette mesure est définie sur la tribu des parties mesurables pour la mesure extérieure λ^* . On appelle *tribu de Lebesgue* cette tribu. Elle contient la tribu des boréliens d'après la proposition III.4.8.

La mesure de Lebesgue sur \mathbb{R}^d est définie de la même manière à partir de la mesure de Lebesgue extérieure sur \mathbb{R}^d (proposition III.4.7).

FIGURE III.4.3 – Décomposition des $]a_n, b_n[$

Exercice III.4.2. (Caractère σ -fini de la mesure de Lebesgue (•))

Montrer que la mesure de Lebesgue sur \mathbb{R} n'est pas finie, mais qu'elle est σ -finie. (Correction page 181)

Proposition III.4.10. (Invariance par translation de λ)

La mesure de Lebesgue est invariante par translation sur \mathbb{R} (et sur \mathbb{R}^d) : pour tout A mesurable, tout $c \in \mathbb{R}$, $A + c$ est mesurable, et

$$\lambda(A + c) = \lambda(A).$$

Démonstration. Les collections d'intervalles $(]a_i, b_i[)_{i \in \mathbb{N}}$ qui recouvrent $A + c$ sont obtenues à partir de celles recouvrant A en translatant tous les intervalles de c . Comme les translations ne changent pas les longueurs des intervalles, la mesure extérieure $\lambda^*(A + c)$ est égale à $\lambda^*(A)$. La mesure de Lebesgue λ étant égale à cette mesure extérieure sur un sous-ensemble de $\mathcal{P}(X)$, on en déduit l'invariance par translation pour λ . \square

Remarque III.4.11. La propriété précédente implique une certaine forme d'*unicité* de la mesure de Lebesgue : si une mesure définie sur les boréliens affecte aux intervalles leur longueurs, alors il s'agit de la mesure de Lebesgue.

III.5 Compléments

La question de savoir si toutes les parties de X sont mesurables pour λ^* n'a pas encore été abordée. Si c'était le cas, la tribu associée \mathcal{A} (voir théorème III.4.4) serait $\mathcal{P}(X)$ tout entier, et λ^* serait une mesure sans qu'il soit nécessaire d'élaguer la tribu discrète de ses membres non mesurables. Nous allons voir que ça n'est pas le cas : il existe bien des parties de \mathbb{R} qui *ne sont pas mesurables* pour λ^* , et qui sont donc exclues de la tribu des parties sur laquelle λ est définie. La proposition suivante établit directement l'existence d'un ensemble non mesurable pour λ . Le principe de cette démonstration reprend une idée simple évoquée dans l'introduction : nous allons en substance décomposer l'intervalle $]0, 1[$ en une infinité dénombrable de parties qui, *si elles sont mesurables*, ont nécessairement pour mesure une même valeur. On est alors confronté à une alternative sans issue : si cette valeur est nulle, alors $]0, 1[$ est de mesure nulle, et si la valeur est strictement positive, la mesure de $]0, 1[$ est infinie.

Proposition III.5.1. (Ensemble de Vitali (•••))

Il existe une partie de \mathbb{R} qui n'est pas λ -mesurable.

Démonstration. On se propose de construire une partie de $I =]0, 1[$ qui n'est pas mesurable. On introduit sur I la relation d'équivalence suivante :

$$x \mathcal{R} y \iff y - x \in \mathbb{Q}.$$

On choisit⁹ un représentant de chaque classe, et l'on note C l'ensemble des représentants ainsi choisis. On considère maintenant une énumération (q_n) des rationnels de l'intervalle $] -1, 1[$, et l'on s'intéresse à la collection des ensembles $q_n + C$, dont nous allons montrer qu'elle vérifie trois propriétés :

(i) Les $q_n + C$ sont disjoints. En effet, si $q_n + x = q_m + y$, avec x et y dans C , on a $y - x = q_n - q_m \in \mathbb{Q}$ donc y et x appartiennent à la même classe. Mais comme C est constitué de représentants uniques de chaque classe, cela implique $x = y$, d'où nécessairement $q_n = q_m$.

(ii) L'union des $q_n + C$ est incluse dans l'intervalle $] -1, 2[$. C'est une conséquence directe du fait que $C \subset]0, 1[$ et $q_n \in] -1, 1[$ pour tout n .

(iii) L'intervalle $]0, 1[$ est inclus dans l'union des $q_n + C$. Tout $y \in]0, 1[$ appartient à sa classe \bar{y} , qui admet un (unique) représentant x dans C , donc $y = x + q$, avec q rationnel de l'intervalle $] -1, 1[$, il s'agit donc de l'un des q_n de notre énumération.

Si C est mesurable, alors les $q_n + C$ sont mesurables, avec $\lambda(q_n + C) = \lambda(C)$ (d'après l'invariance par translation établie dans la proposition III.4.10). D'après (i) et l'additivité de la mesure λ , on a alors

$$\lambda\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} (q_n + C)\right) = \sum_{n \in \mathbb{N}} \lambda(q_n + C) = \sum_{n \in \mathbb{N}} \lambda(C).$$

Si $\lambda(C) = 0$, alors la somme ci-dessus est nulle, ce qui est absurde car, d'après (iii), $\bigcup (q_n + C)$ contient l'intervalle $]0, 1[$, qui est de mesure 1. Si $\lambda(C) > 0$, alors la somme est infinie, ce qui est absurde aussi car, d'après (ii), l'union des $q_n + C$ est contenue dans $] -1, 2[$, qui est de mesure finie. L'ensemble C n'est donc pas mesurable. \square

La démarche menée ci-dessus permet en fait de démontrer un résultat plus général qui, si l'on se base sur l'axiome du choix, assure l'impossibilité de construire une mesure sur la tribu discrète de \mathbb{R} , qui affecte aux intervalles leurs longueurs, et qui soit invariante par translation.

Proposition III.5.2. Il n'existe aucune mesure sur \mathbb{R} définie sur la tribu discrète qui soit invariante par translation et qui affecte aux intervalles leur longueur.

Théorème III.5.3. (Régularité de la mesure de Lebesgue (•••))

La mesure de Lebesgue sur \mathbb{R}^d est dite *régulière* au sens où, pour tout A mesurable,

$$\begin{aligned} \lambda(A) &= \inf(\lambda(U), U \text{ ouvert}, A \subset U) \\ &= \sup(\lambda(K), K \text{ compact}, K \subset A). \end{aligned}$$

Démonstration. Notons en premier lieu que, par monotonie, on a

$$\begin{aligned} \lambda(A) &\leq \inf(\lambda(U), U \text{ ouvert}, A \subset U) \\ \lambda(A) &\geq \sup(\lambda(K), K \text{ compact}, K \subset A). \end{aligned}$$

Le fait que la première inégalité soit une égalité découle directement de la définition : pour tout $\varepsilon > 0$, il existe une collection de pavés dont la réunion contient A , et telle que la somme des volumes est inférieure à $\lambda(A) + \varepsilon$, et cette réunion est un ouvert, l'infimum est donc égal à $\lambda(A)$.

9. Il s'agit d'un point très délicat de la construction. Lorsque l'on dispose d'une infinité d'ensemble, il existe parfois une manière de *choisir* un élément de chacun des ensembles. Par exemple s'il s'agit d'intervalles fermés bornés, on peut prendre la borne inférieure. Ici il s'agit d'ensembles qui n'admettent pas de plus petit (ni de plus grand) élément, la procédure n'est donc pas applicable. De fait, on peut se convaincre qu'il n'existe pas de procédure systématique pour effectuer ce choix, et la possibilité d'extraire de la collection d'ensemble une collection de représentants repose sur ce qu'on appelle l'*axiome du choix*, qui est une assertion que l'on ne peut pas démontrer à partir des axiomes de base de la théorie des ensembles, que l'on doit donc rajouter aux fondements de la théorie pour disposer de cette propriété.

Pour l'approximation intérieure, supposons dans un premier temps que A est borné, et considérons un fermé borné C qui contient A . Soit $\varepsilon > 0$. D'après ce qui précède, il existe U ouvert contenant $C \setminus A$ tel que

$$\lambda(U) \leq \lambda(C \setminus A) + \varepsilon.$$

Soit $K = C \setminus U = C \cap U^c$. Il s'agit d'un fermé borné par construction, donc d'un compact, et il est inclus dans A . On a $C \subset K \cup U$, donc $\lambda(C) \leq \lambda(K) + \lambda(U)$. On a donc finalement (du fait que $\lambda(C) = \lambda(C \setminus A) + \lambda(A)$),

$$\begin{aligned} \lambda(K) \geq \lambda(C) - \lambda(U) &= \lambda(C \setminus A) + \lambda(A) - \underbrace{\lambda(U)}_{\leq \lambda(C \setminus A) + \varepsilon} \\ &\geq \lambda(C \setminus A) + \lambda(A) - \lambda(C \setminus A) - \varepsilon \\ &= \lambda(A) - \varepsilon. \end{aligned}$$

On a donc bien égalité entre $\lambda(A)$ et le supremum.

Si A n'est pas borné, on l'écrit comme union croissante $\cup_j A_j$, où les A_j sont les intersections de A avec les boules fermées de rayon j . La mesure de A est la limite des $\lambda(A_j)$ d'après la proposition III.3.6, page 76. Si $\lambda(A) < +\infty$, il existe donc j tel que $\lambda(A_j) \geq \lambda(A) - \varepsilon$, et la construction précédente appliquée à A_j assure l'existence d'un compact K tel que $\lambda(K) \geq \lambda(A) - 2\varepsilon$. Si $\lambda(A) = +\infty$, alors $\lambda(A_j)$ tend vers $+\infty$, et l'on peut construire une suite de compacts $K_j \subset A$ tels que $\lambda(K_j) \geq \lambda(A_j) - 2\varepsilon$, qui tend vers $+\infty$. \square

III.6 Exercices

Les trois premiers exercices ne nécessitent aucune connaissance sur les tribus ou la théorie de la mesure, ils ont vocation à sensibiliser en amont aux difficultés de la démarche de construction d'une mesure et d'une théorie de l'intégration, qui passe par la sommation d'une infinité de contributions.

Exercice III.6.1. a) Soit (x_n) une suite de réels positifs telle que la série $\sum x_n$ converge. Montrer que la valeur de la somme ne dépend pas de l'ordre dans lequel on effectue les sommations.

b) Soit maintenant (x_n) une suite de réels telle que la série $\sum x_n$ soit convergente, mais sans que la série soit absolument convergente. On cherche à montrer que, selon l'ordre dans lequel on effectue la somme, on peut obtenir essentiellement *n'importe quoi*.

Plus précisément, montrer que, pour tout $\lambda \in [-\infty, +\infty]$, il existe une bijection φ sur \mathbb{N} telle que la série $\sum x_{\varphi(n)}$ converge vers λ . Montrer qu'il existe aussi une bijection telle que l'ensemble des valeurs d'adhérence de la série soit \mathbb{R} tout entier. (Correction page 181)

Exercice III.6.2. *Ce petit exercice illustre d'une certaine manière l'impossibilité de définir une mesure finie sur un ensemble infini non dénombrable en affectant un point strictement positif à chaque point.*

Soit $(a_i)_{i \in I}$ une famille infinie de réel positifs ou nuls, possédant la propriété suivante :

$$\forall J \subset I, J \text{ dénombrable}, \sum_{i \in J} a_i < +\infty.$$

Montrer que l'ensemble des i tels que $a_i > 0$ est nécessairement dénombrable. (Correction page 182)

Exercice III.6.3. Montrer que pour tout $\varepsilon > 0$ il existe une collection d'intervalles ouverts I_n disjoints telle que la réunion des intervalles soit dense dans \mathbb{R} , et telle que la somme des longueurs soit inférieure à ε . (Correction page 182)

Exercice III.6.4. Soit X un ensemble. On note \mathcal{A} l'ensemble des parties A telles que A ou A^c est dénombrable. Montrer que \mathcal{A} est une tribu. Quelle est cette tribu dans le cas où X est fini ou dénombrable ? (Correction page 182)

Exercice III.6.5. Soit X un ensemble infini. Décrire la tribu engendrée par la collection des singletons, selon que X soit dénombrable ou pas. (Correction page 182)

Exercice III.6.6. (Tribus sur l'ensemble à N éléments (••))

a) Décrire l'ensemble des tribus sur $X_N = \llbracket 1, N \rrbracket$.

b) Préciser le cardinal de chacune de ces tribus.

c) (•••) Préciser le nombre B_N total de tribus sur N , sous la forme d'une relation de récurrence, qui exprime B_{N+1} en fonction des B_n jusqu'à N . (Correction page 182)

Exercice III.6.7. Montrer qu'il existe un ensemble dénombrable qui engendre la tribu borélienne de \mathbb{R} . (Correction page 183)

Exercice III.6.8. (Tribu image / mesure image)

a) Soit (X, \mathcal{A}) un espace mesuré, X' un ensemble, et f une application de X dans X' . On définit

$$\mathcal{A}' = \{A' \subset X', f^{-1}(A') \in \mathcal{A}\}.$$

Montrer que \mathcal{A}' est une tribu, que l'on appelle tribu – image de \mathcal{A} par f .

b) Montrer que \mathcal{A}' est la *plus grande* tribu que l'on puisse mettre sur X' , qui rende f mesurable.

c) On considère maintenant (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré, (X', \mathcal{A}') un espace mesurable¹⁰, et f une application mesurable de X vers X' . On définit l'application

$$\nu : \mathcal{A}' \ni A' \mapsto \mu(f^{-1}(A')).$$

Montrer que l'on définit ainsi une mesure sur (X', \mathcal{A}') , appelée mesure – image de μ par f , ou *poussé en avant* de μ par f , ce que l'on note $\nu = f_{\#}\mu$. Montrer que la masse est conservée par cette opération de transport, c'est-à-dire que $\nu(X') = \mu(X)$.

Si l'on suppose que la mesure μ est la loi de probabilité d'une variable aléatoire X , quelle est l'interprétation de ν ?

c bis) Montrer que l'opération dans l'autre sens n'est pas pertinente. Plus précisément, on considère une application f mesurable d'un espace mesurable (X, \mathcal{A}) dans un espace mesuré (X', \mathcal{A}', ν) , et l'on définit sur \mathcal{A} l'application η sur \mathcal{A} définie par $\eta(A) = \nu(f(A))$. Montrer par un ou plusieurs contre-exemples que η n'est pas une mesure en général.

d) On se place maintenant sur $X = X' = \mathbb{R}$ muni de la tribu borélienne, et de la mesure de Lebesgue λ . Décrire la mesure image $\nu = f_{\#}\lambda$ dans les cas suivants :

(i) $f(x) = x + c$, où $c \in \mathbb{R}$.

(ii) $f(x) = \alpha x$, avec $\alpha \neq 0$.

(iii) $f(x) = E(x)$ (partie entière de x).

(iv) $f(x) = 0$.

(v) $f(x) = \exp(x)$ (on précisera la mesure des intervalles $]a, b[$ dans l'espace d'arrivée).

(★) On considère maintenant deux mesures μ et ν sur $(\mathbb{R}, \mathcal{B})$, de même masse totale finie, et l'on note $\Lambda_{\mu, \nu}$ l'ensemble des fonctions f mesurables de \mathbb{R} dans \mathbb{R} qui transportent μ vers ν :

$$\Lambda_{\mu, \nu} = \{f, f_{\#}\mu = \nu\}.$$

e) (★) Montrer que, si f dans $\Lambda_{\mu, \nu}$, alors toute fonction g égale à f μ – presque partout est aussi dans $\Lambda_{\mu, \nu}$.

g) (★) Montrer au travers d'exemples que $\Lambda_{\mu, \nu}$ peut-être vide, ou réduit à un singleton (en identifiant les fonctions égales μ – presque partout), ou contenir un nombre fini d'éléments, ou contenir une infinité non dénombrable d'éléments. (Correction page 183)

Exercice III.6.9. (Peigne de Dirac)

On se place sur la tribu des boréliens de \mathbb{R} , $\mathcal{A} = \mathcal{B}(\mathbb{R})$, et l'on définit la mesure de comptage μ_0 de la façon suivante : pour toute partie A de \mathbb{R} , on définit $\mu_0(A) = \text{Card}(A \cap \mathbb{Z})$ comme le nombre d'entiers relatifs que A contient. On écrit, en utilisant la notation introduite dans le deuxième des exemples III.3.1 :

$$\mu_0 = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \delta_k.$$

a) Montrer que l'on définit ainsi une mesure sur \mathbb{R} qui est σ –finie, sans être finie.

Quels sont les ensembles de mesure pleine pour μ_0 ? (voir définition III.3.9).

10. La tribu \mathcal{A}' peut être la tribu image de \mathcal{A} par f , auquel cas f est automatiquement mesurable, mais pas forcément.

Donner un exemple de fonctions égales μ_0 -presque partout, qui sont pourtant très différentes au sens usuel du terme.

Construire une mesure du même type, en modifiant les coefficients de la somme ci-dessus, qui soit finie.

b) On définit maintenant, pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$\mu_n = \frac{1}{2^n} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \delta_{k/2^n}.$$

Montrer qu'il s'agit encore d'une mesure infinie, et que l'on n'a ni $\mu_n \ll \lambda$ (mesure de Lebesgue), ni $\lambda \ll \mu_n$.

Montrer que, pour tout intervalle $]a, b[\subset \mathbb{R}$, on a

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \mu_n(]a, b[) \longrightarrow \lambda(]a, b[) = b - a,$$

où λ est la mesure de Lebesgue sur \mathbb{R} .

c) Montrer que, malgré la propriété de la question précédente, on n'a pas convergence de $\mu_n(A)$ vers $\mu(A)$ pour tout $A \in \mathcal{B}$. (Correction page 185)

Exercice III.6.10. Soit μ une mesure finie sur (X, \mathcal{A}) .

a) Montrer que l'on a, pour tous $A, B \in \mathcal{A}$.

$$\mu(A \cup B) = \mu(A) + \mu(B) - \mu(A \cap B).$$

b) Montrer que l'on a, pour tous $A, B, C \in \mathcal{A}$.

$$\mu(A \cup B \cup C) = \mu(A) + \mu(B) + \mu(C) - \mu(A \cap B) - \mu(A \cap C) - \mu(B \cap C) + \mu(A \cap B \cap C).$$

c) Proposer une formule analogue pour une réunion d'un nombre quelconque (mais fini) d'éléments de \mathcal{A} . (Correction page 185)

Exercice III.6.11. On se place sur \mathbb{R} muni de sa tribu borélienne, et l'on définit $\mu(A)$ comme le cardinal de l'ensemble des nombres rationnels contenus dans A .

a) Montrer qu'il s'agit d'une mesure sur $\mathcal{B}(\mathbb{R})$, qui est σ -finie, et qui donne une mesure infinie ou nulle à tout ouvert de \mathbb{R} .

b) Montrer que μ n'est pas comparable à la mesure de Lebesgue λ (on n'a ni $\mu \ll \lambda$, ni $\lambda \ll \mu$). (Correction page 186)

Exercice III.6.12. (Un réel sur deux)

On se propose ici de montrer qu'il n'existe aucun sous-ensemble de \mathbb{R} qui contiendrait d'une certaine manière "un réel sur deux" quelle que soit l'échelle à laquelle on le regarde, et qui serait ainsi une sorte d'équivalent continu de l'ensemble des entiers pairs dans \mathbb{N} .

On note λ la mesure de Lebesgue sur \mathbb{R} .

a) Pour $n \geq 1$, on définit A_n comme l'ensemble des réels dont la n -ème décimale (en écriture propre) est entre 0, 1, 2, 3, ou 4. Montrer que pour tout intervalle I dont la longueur est un multiple entier de 10^{-n+1} , on a $\lambda(I \cap A_n) = \lambda(I)/2$.

Montrer que, pour tout intervalle $I =]a, b[$, on a

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \lambda(I \cap A_n) = \frac{1}{2} \lambda(I).$$

b) Montrer qu'il n'existe aucune partie A de \mathbb{R} mesurable telle que l'on ait

$$\lambda(A \cap]a, b[) = \frac{b-a}{2} \quad \forall a, b, a < b.$$

(Correction page 186)

Exercice III.6.13. (Ensemble de Cantor)

On pose $K_0 = [0, 1]$, et l'on définit $K_1 = K_0 \setminus]1/3, 2/3[$, qui est donc la réunion de 2 intervalles fermés. On construit K_2 en retirant de la même manière le tiers central aux deux intervalles qui composent K_1 . On construit ainsi K_3, \dots, K_n , qui est la réunion de 2^n intervalles de même longueur $1/3^n$. On définit l'ensemble de Cantor K comme l'intersection de K_n .

a) Montrer que K est un compact de \mathbb{R} , d'intérieur vide.

b) Montrer que K a la puissance du continu, c'est-à-dire qu'il est infini non dénombrable, plus précisément équipotent à \mathbb{R} .

c) Montrer que K est Lebesgue – mesurable, de mesure nulle.

(Correction page 187)

III.7 Fonctions mesurables, intégrale de Lebesgue

Nous décrivons dans cette section une procédure permettant de définir la notion d'intégrale pour une classe très générale de fonctions.

III.7.1 Fonctions mesurables

Rappelons qu'une application d'un espace mesurable (X, \mathcal{A}) dans (X', \mathcal{A}') est dite mesurable si l'image réciproque par f de tout élément de \mathcal{A}' est dans \mathcal{A} .

Dans le cas où l'espace d'arrivée est \mathbb{R} , on le considèrera par défaut muni de la tribu des boréliens, engendrée par les intervalles de type $] -\infty, c]$ (voir proposition III.2.7, page 69).

Dans le cas où l'espace d'arrivée est $\overline{\mathbb{R}} = [-\infty, \infty]$, on le considèrera aussi, sans qu'il soit besoin de le préciser, muni de sa tribu borélienne, engendrée par les $[-\infty, c]$ (voir proposition III.2.8, page 70).

On parlera donc simplement de fonction mesurable de (X, \mathcal{A}, μ) à valeurs dans \mathbb{R} ou dans $\overline{\mathbb{R}}$, en gardant en tête que ces espaces sont munis de leurs tribus boréliennes. Si l'espace de départ est lui-même \mathbb{R} (ou \mathbb{R}^d), on parle de fonction mesurable de \mathbb{R} dans \mathbb{R} , où l'on considère l'espace de départ muni de la tribu de Lebesgue¹¹ (voir définition III.4.9, page 83).

Le caractère mesurable de telles fonctions se caractérise de façon élémentaire, comme l'exprime la proposition suivante.

Proposition III.7.1. (•) : Soit (X, \mathcal{A}) un espace mesurable, et f une fonction de X dans \mathbb{R} . La fonction f est mesurable si et seulement si, pour tout c réel

$$f^{-1}(]-\infty, c]) \in \mathcal{A}.$$

Pour une fonction à valeurs dans $\overline{\mathbb{R}}$, la condition est la même, pour les intervalles du type $[-\infty, c]$.

Démonstration. C'est une conséquence directe de la proposition III.2.12, page 71, qui donne un critère simple de mesurabilité d'une application : si la tribu sur l'espace d'arrivée est engendrée par une certaine famille, il suffit de vérifier que l'image réciproque de chaque élément de cette famille est dans la tribu sur l'espace de départ. \square

Exercice III.7.1. Soit f une fonction monotone de \mathbb{R} dans \mathbb{R} . Montrer que f est mesurable. (Correction page 187)

Proposition III.7.2. Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré, et (f_n) une suite de fonctions mesurables de X dans $[-\infty, +\infty]$. On a alors

- a) Les fonctions $\sup f_n$ et $\inf f_n$ sont mesurables.
- b) Les fonctions $\limsup f_n$ et $\liminf f_n$ (voir définition IV.1.23) sont mesurables.
- c) Si (f_n) converge simplement vers f , alors f est mesurable.

Démonstration. a) Soit (f_n) une suite de fonctions mesurables. On définit

$$f_{\sup} = \sup(f_n) \text{ et } f_{\inf} = \inf(f_n).$$

11. Il peut sembler surprenant, lorsque l'on considère des fonctions de \mathbb{R} dans \mathbb{R} , de munir les espaces d'arrivée et de départ de tribus différentes. L'intérêt de ce choix est de rendre le plus possible de fonctions mesurables, du fait que le critère de mesurabilité est d'autant plus laxiste que la tribu d'arrivée est grossière, et la tribu de départ fine. Noter que, en pratique, on montrera en général que $f^{-1}(]-\infty, b])$ est un borélien, donc *a fortiori* membre de la tribu de Lebesgue, de telle sorte que pour les situations usuelles, munir l'espace de départ de la tribu des boréliens ne changerait pas grand'chose.

On a, pour tout c dans \mathbb{R} ,

$$f_{\sup}(x) = \sup(f_n(x)) \leq c \iff f_n(x) \leq c \quad \forall n,$$

d'où

$$f_{\sup}^{-1}([-\infty, c]) = \bigcap_n f_n^{-1}([-\infty, c]),$$

qui est mesurable comme intersection de mesurables.

On a par ailleurs

$$f_{\inf}(x) = \inf(f_n(x)) \leq c \iff \forall N, \exists n, f_n(x) \leq c + 1/N,$$

d'où

$$f_{\inf}^{-1}([-\infty, c]) = \bigcap_N \bigcup_n f_n^{-1}([-\infty, c + 1/N]),$$

qui est mesurable comme intersections dénombrable de mesurables (eux même mesurables comme union dénombrable de mesurables).

b) Soit maintenant $f_{\lim \sup}$ définie par

$$f_{\lim \sup}(x) = \lim \sup f_n(x) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sup_{k \geq n} f_k(x).$$

On introduit $g_n = \sup_{k \geq n} f_k$ d'après ce qui précède, les g_n sont mesurables. La suite $g_n(x)$ étant décroissante pour tout x , elle converge dans $[-\infty, +\infty[$, et l'on a, pour tout x

$$\lim \sup f_n = \lim g_n = \inf g_n,$$

qui est mesurable toujours d'après ce qui précède.

On procède de la même manière pour la $\lim \inf$ en introduisant $h_n = \inf_{k \geq n} f_k$ qui est croissante.

c) Du fait que $\lim f_n = \lim \sup f_n$, la mesurabilité de la limite simple est conséquence immédiate de ce qui précède. \square

Proposition III.7.3. Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré. Pour tous f, g mesurables, pour tout $\alpha \in \mathbb{R}$, αf et $f + g$ sont mesurables. L'ensemble des fonctions mesurables est donc un espace vectoriel.

Démonstration. Si $\alpha = 0$, $(\alpha f)^{-1}([-\infty, c])$ est soit vide, soit X tout entier. Pour $\alpha > 0$

$$(\alpha f)^{-1}([-\infty, c]) = \{x, f(x) \leq c/\alpha\},$$

qui est dans \mathcal{A} . Si $\alpha < 0$, on a

$$\begin{aligned} (\alpha f)^{-1}([-\infty, c]) &= \{x, \alpha f(x) \leq c\} = \{f(x) \geq c/\alpha\} = \\ &= \{x, f(x) < c/\alpha\}^c = \left(\bigcup_n \{x, f(x) \leq c/\alpha - 1/2^n\} \right)^c \end{aligned}$$

qui est bien dans \mathcal{A} par mesurabilité de f .

Considérons maintenant f et g mesurables. Montrons que $f(x) + g(x) < c$ si et seulement s'il existe un nombre rationnel q tel que

$$f(x) + q < c \text{ et } g(x) < q.$$

La condition suffisante est immédiate. Pour la condition nécessaire, on choisit un rationnel q tel que $g(x) < q < c - f(x)$ (il existe par densité des rationnels dans \mathbb{R}). Si l'on note (q_n) une énumération des rationnels, on a

$$\{x, f(x) + g(x) < c\} = \bigcap_{n=0}^{+\infty} \{x, f(x) + g(x) < c + 1/2^n\}.$$

Chacun des ensembles ci-dessus est du type

$$\{x, f(x) + g(x) < c'\} = \bigcup_m (\{x, f(x) + q_m < c'\} \cap \{x, g(x) < q_m\}),$$

qui est mesurable comme union dénombrable de parties mesurables. L'ensemble

$$\{x, f(x) + g(x) \leq c\}$$

est donc mesurable comme intersection dénombrable d'ensembles mesurables. \square

Proposition III.7.4. (•) Soit un espace topologique, et \mathcal{B} sa tribu des boréliens (engendrée par les ouverts, ou de façon équivalente par les fermés). Toute fonction f continue de (X, \mathcal{B}) dans $\overline{\mathbb{R}}$ est mesurable.

Démonstration. Pour tout $b \in \mathbb{R}$, l'intervalle $[-\infty, b]$ étant un fermé, son image réciproque par f est un fermé, il est donc dans \mathcal{B} (et a fortiori dans la tribu de Lebesgue). \square

Fonctions simples, fonctions étagées

Définition III.7.5. (Fonction simple, fonction étagée (•))

Soit X un ensemble. On appelle fonction *simple* une application de X dans \mathbb{R} qui prend un nombre fini de valeurs $\alpha_1, \dots, \alpha_n$.

Si (X, \mathcal{A}) est un espace mesurable, et que l'application simple f est mesurable, ce qui est équivalent à dire que $f^{-1}(\{\alpha_i\}) \in \mathcal{A}$ pour tout i , on parle de fonction *étagée*.

On notera

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \mathbb{1}_{A_i}, \quad (\text{III.7.1})$$

où les A_i sont mesurables, disjoints, et les α_i sont des réels (non nécessairement distincts).

On vérifie immédiatement que αf est étagée pour tout α réel, toute fonction f étagée. Pour la somme, on enrichit l'expression (III.7.1) de f en rajoutant le terme $\beta_0 \mathbb{1}_{A_0}$, avec $\beta_0 = 0$, et où A_0 est le complémentaire de l'union des A_i , de telle sorte que les A_0, \dots, A_N forment une partition de X . On fait de même pour g . La somme est une fonction étagée¹²

$$f + g = \sum_{i,j} (\alpha_i + \beta_j) \mathbb{1}_{A_i \cap B_j},$$

L'ensemble des fonctions étagée est donc un espace vectoriel, que l'on notera $\mathcal{E}(X)$ ou simplement \mathcal{E} . On notera \mathcal{E}^+ le sous-ensemble (qui est un cône convexe) des fonctions étagées à valeurs positives.

Nous terminons cette section par une propriété d'approximation des fonctions mesurables positives par des fonctions étagées.

Proposition III.7.6. (Approximation d'une fonction mesurable par des fonctions étagées (••))

Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré, et f une fonction mesurable de X dans $[0, +\infty]$. Il existe une suite (f_n) de fonctions de \mathcal{E}^+ , croissante, avec $f_n \leq f$ pour tout n , qui converge simplement vers f , c'est à dire que

$$f(x) = \lim_n f_n(x) \quad \forall x \in X.$$

12. Noter que, dans l'écriture qui suit, il est possible que certaines des sommes $\alpha_i + \beta_j$ soient égales (même si les α_i et les β_j sont distincts entre eux), ce que nous n'avons pas interdit dans l'écriture (III.7.1). En revanche les $A_i \cap B_j$ sont bien disjoints deux à deux. s

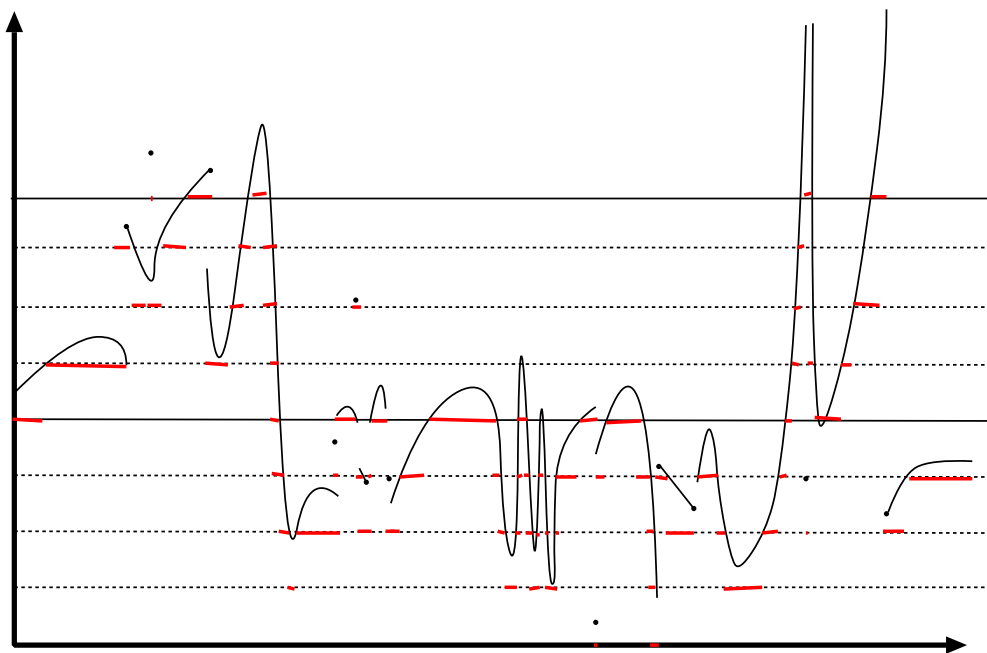


FIGURE III.7.1 – Approximation inférieure d’une fonction f (en noir) par une suite croissante de fonctions étagées.

Démonstration. La démonstration repose sur la construction explicite d’une fonction étagée, qui reproduit de façon abstraite ce que ferait un logiciel de traitement d’image pour échantillonner les niveaux de gris, de façon à limiter l’espace mémoire nécessaire pour stocker l’image. L’idée est simplement de pratiquer cet échantillonnage avec une précision arbitrairement grande (dans le cas d’une image, il s’agirait de faire tendre vers l’infini le nombre de *bits* utilisés pour encoder les niveaux de gris). La petite différence avec ce cadre informatique est qu’ici on ne peut pas supposer que les valeurs de la fonction sont bornées, on doit donc construire une approximation de plus en plus fine, mais qui s’étale aussi sur une plage de valeurs de plus en plus grande. Pour tout entier $n \geq 1$, tout $k = 1, \dots, n2^n$, on définit dans cet esprit (voir figure III.7.1 pour $n = 2$)

$$A_{n,k} = \{x, (k-1)/2^n \leq f(x) < k/2^n\}.$$

Pour tout n , les $A_{n,k}$ sont disjoints, et sont mesurables par mesurabilité de f . On définit maintenant la fonction f_n en affectant la valeur $(k-1)/2^n$ pour tout $x \in A_{n,k}$, et la valeur n pour les x qui ne sont dans aucun des $A_{n,k}$ (là où la valeur de f dépasse n). Les fonctions f_n sont étagées, la suite est croissante, et on a convergence simple de f_n vers f . \square

Remarque III.7.7. La construction proposée dans la preuve précédente est *monotone* : si f et g sont deux fonctions mesurables avec $f \leq g$, f_n et g_n les suites associées, on a $f_n \leq g_n$ pour tout n .

III.7.2 Intégrale de fonctions étagées

Définition III.7.8. (Intégrale d’une fonction étagée positive (•))

Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré, c’est-à-dire un ensemble muni d’une tribu \mathcal{A} (définition III.2.13). Soit f une fonction étagée positive :

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \mathbb{1}_{A_i},$$

où les A_i sont mesurables, disjoints, et les α_i sont des réels strictement positifs¹³. On définit¹⁴ l'intégrale de f sur X comme la quantité

$$\int_X f(x) d\mu(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \mu(A_i). \quad (\text{III.7.2})$$

Pour tout $A \in \mathcal{A}$, on définit de la même manière

$$\int_A f(x) d\mu(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \mu(A_i \cap A).$$

Remarque III.7.9. On peut illustrer cette approche dans le contexte des images telles que celles qui sont stockées sur ordinateur. On peut voir une telle image (disons en noir et blanc pour simplifier) comme un tableau à $N \times N$ nombres dans l'intervalle $[0, 1]$, qui correspondent aux niveaux de gris. Ces niveaux de gris sont en général stockés en format 8 bits, ce qui signifie que chaque niveau peut prendre l'une des 256 valeurs de la subdivision uniforme de $[0, 1]$. Si l'on cherche à calculer la somme des niveaux de gris sur l'ensemble de l'image, l'approche usuelle (qui correspond à la philosophie de l'intégrale de Riemann) consiste à sommer les valeurs des pixels successifs :

$$S = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N u_{ij}.$$

L'approche suivie ici pour définir l'intégrale correspondrait à la démarche suivante, structurée par l'espace d'arrivée (les niveaux de gris), et pas l'espace de départ (les pixels) : pour chaque valeur g_k de niveau de gris, on considère l'ensemble A_k des pixels qui réalisent cette valeur. La somme est alors estimée selon la formule

$$S = \sum_{k=0}^{255} g_k \times \text{Card}(A_k).$$

Cette approche repose implicitement sur l'*histogramme* de l'image, qui est la représentation de la distribution des niveaux de gris : en abscisse les 256 niveaux de gris, et en ordonnée les cardinaux des ensembles A_k correspondants.

Proposition III.7.10. (•) Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré, f et g deux fonctions de \mathcal{E}^+ , et $\alpha \geq 0$. On a

$$\int_X (\alpha f) d\mu = \alpha \int_X f d\mu, \quad \int_X (f + g) d\mu = \int_X f d\mu + \int_X g d\mu,$$

et

$$f(x) \leq g(x) \quad \forall x \in X \quad \implies \quad \int_X f d\mu \leq \int_X g d\mu.$$

13. Cette stricte positivité n'était pas imposée dans l'écriture III.7.1 pour anticiper la situation où la somme de deux fonction étagées signées puisse conduire à des $\alpha_i + \beta_j$ nuls, mais nous considérons ici que nous ne gardons que les valeurs > 0 , pour éviter d'avoir à préciser qu'une valeur nulle sur une partie de mesure infinie (qui prend une forme indéterminée $0 \times +\infty$) apporte une contribution nulle à l'intégrale.

14. Si l'on n'impose pas $A_i = f^{-1}(\{\alpha_i\})$, l'écriture (III.7.1) de f n'est pas unique. On peut néanmoins vérifier que la quantité définie par (III.7.2) ne dépend pas de l'écriture choisie. En effet, si l'on considère une autre écriture

$$\sum_{i=1}^{N'} \alpha'_i \mu(A'_i),$$

on a, par additivité de la mesure, et du fait que $\alpha_i = \alpha'_j$ sur $A_i \cap A'_j$,

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i \mu(A_i) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N'} \alpha_i \mu(A_i \cap A'_j) = \sum_{j=1}^{N'} \sum_{i=1}^N \alpha'_i \mu(A_i \cap A'_j) = \sum_{j=1}^{N'} \alpha'_j \mu(A'_j).$$

Démonstration. La première identité est conséquence directe de la définition. Pour la somme, on enrichit l'expression (III.7.1) de f en rajoutant le terme $\beta_0 \mathbb{1}_{A_0}$, avec $\beta_0 = 0$, et où A_0 est le complémentaire de l'union des A_i , de telle sorte que les A_0, \dots, A_N forment une partition de X . On fait de même pour g . On a¹⁵

$$f + g = \sum_{i,j} (\alpha_i + \beta_j) \mathbb{1}_{A_i \cap B_j},$$

d'où

$$\begin{aligned} \int (f + g) &= \sum_{i,j} (\alpha_i + \beta_j) \mu(A_i \cap B_j) = \sum_i \alpha_i \sum_j \mu(A_i \cap B_j) + \sum_j \beta_j \sum_i \mu(A_i \cap B_j) \\ &= \sum_i \alpha_i \mu(A_i) + \sum_j \beta_j \mu(B_j) = \int f + \int g \end{aligned}$$

par additivité de la mesure. \square

Proposition III.7.11. (•) Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré, f une fonction de \mathcal{E}^+ , et (f_n) une suite de fonctions de \mathcal{E}^+ (fonctions étagées positives). On suppose que (f_n) est croissante, c'est-à-dire que $(f_n(x))$ est une suite croissante pour tout x de X , et que f_n converge simplement vers f , c'est à dire que

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(x) = f(x) \quad \forall x \in X.$$

L'intégrale de f est alors la limite des intégrales des f_n :

$$\int_X f d\mu = \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_X f_n d\mu.$$

Démonstration. On a, d'après la proposition III.7.10, $\int f_n \leq \int f$ pour tout $n \in \mathbb{N}$. La suite des intégrales, croissante, converge donc vers une valeur $\lim \int f_n \leq \int f$. Montrons que cette inégalité est en fait une égalité. On sait que f peut s'écrire

$$f = \sum_{i=1}^N a_i \mathbb{1}_{A_i},$$

où les A_i sont des éléments disjoints de \mathcal{A} , et les a_i des réels strictement positifs. Soit $\varepsilon > 0$. Pour $i = 1, \dots, N$, on introduit

$$A_i^n = \{x \in A_i, f_n(x) \geq (1 - \varepsilon)a_i\} \in \mathcal{A}.$$

Pour tout i , la suite des (A_i^n) est croissante d'après la croissance de f_n , et l'union des A_i^n est égale à A_i par convergence simple de f_n vers f . On a donc, d'après la proposition III.3.6, page 76,

$$\lim_n \mu(A_i^n) = \mu(A_i).$$

On considère maintenant la fonction g_n définie par

$$g_n = \sum_{i=1}^N (1 - \varepsilon)a_i \mathbb{1}_{A_i^n}.$$

C'est une fonction étagée, qui vérifie $g_n \leq f_n \leq f$, et la suite (g_n) est croissante. La suite réelle $(\int g_n)$ converge donc, et l'on a

$$\lim_n \int f_n \geq \lim_n \int g_n = \lim_n \left(\sum_{i=1}^N (1 - \varepsilon)a_i \mu(A_i^n) \right) = (1 - \varepsilon) \sum_{i=1}^N a_i \mu(A_i) = (1 - \varepsilon) \int f.$$

Cette inégalité étant vérifiée pour tout $\varepsilon > 0$, on a bien $\lim_n \int f_n \geq \int f$, ce qui termine la preuve. \square

15. Noter que dans l'écriture qui suit, il est possible que certaines des sommes $\alpha_i + \beta_j$ soient égales (même si les α_i et les β_j sont distincts entre eux), ce que nous n'avons pas interdit dans l'écriture (III.7.1). En revanche les $A_i \cap B_j$ sont bien disjoints deux à deux. s

III.7.3 Intégrale de fonctions mesurables

Cette définition de l'intégrale pour les fonctions étagées peut être étendue à une fonction f positive plus générale en considérant le supremum de l'ensemble des valeurs prises par les intégrales des fonctions étagées qui sont inférieures à f en tout point, comme le précise la définition suivante.

Définition III.7.12. (Intégrale d'une fonction mesurable positive (•))

Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré, et f une fonction mesurable de X dans $[0, +\infty]$. On définit l'intégrale de f sur X comme la quantité

$$\int_X f(x) d\mu = \sup_{g \in \mathcal{E}^+, g \leq f} \left(\int_X g(x) d\mu \right) \in [0, +\infty].$$

On définit de la même manière l'intégrale de f sur toute partie A mesurable.

Proposition III.7.13. (Monotonie de l'intégrale)

Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré, f et g deux fonctions mesurables de X dans $[0, +\infty]$. On a

$$f \leq g \implies \int_X f d\mu \leq \int_X g d\mu.$$

Démonstration. Si $f \leq g$, alors toute fonction h de \mathcal{E}^+ admissible dans le sup définissant l'intégrale de f est admissible pour celui définissant g , d'où l'inégalité sur les intégrales. \square

Exercice III.7.2. Montrer, en utilisant la définition précédente, que l'intégrale de la fonction indicatrice de l'ensemble des rationnels dans \mathbb{R} est d'intégrale nulle. (Correction page 187)

L'intégrale définie ci-dessus ne “voit” pas les ensembles négligeables :

Proposition III.7.14. Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré, f et g des fonctions mesurables de X dans $[0, +\infty]$. On suppose que $f(x) = g(x)$ presque partout. Alors

$$\int_X f(x) d\mu(x) = \int_X g(x) d\mu(x).$$

Démonstration. On introduit $A \in \mathcal{A}$ sur lequel f et g s'identifient, tel que $\mu(A^c) = 0$. Toute fonction de $h \in \mathcal{E}^+$, inférieure à f , s'écrit

$$h = \sum_{i=1}^N a_i \mathbb{1}_{A_i} = \sum_{i=1}^N a_i \mathbb{1}_{A_i \cap A} + \sum_{i=1}^N a_i \mathbb{1}_{A_i \cap A^c}.$$

On a

$$\int h = \sum_{i=1}^N a_i \mu(A_i \cap A) + \sum_{i=1}^N a_i \mu(A_i \cap A^c).$$

Le second terme est nul car $\mu(A_i \cap A^c) \leq \mu(A^c) = 0$ pour tout i . Le premier terme est l'intégrale d'une fonction étagée qui est inférieure à f , donc à g (là où la fonction ne s'annule pas, f et g s'identifient). Cette quantité est donc inférieure à $\int g \in [0, +\infty]$, et ce pour tout h de \mathcal{E}^+ inférieure à f . On a donc $\int f \leq \int g$. Les rôles de f et g étant interchangeables, on montre de la même manière $\int g \leq \int f$, d'où l'identité des valeurs des deux intégrales. \square

La proposition suivante, qui étend la proposition III.7.11 à une fonction mesurable quelconque (non nécessairement étagée), peut être vue comme une version préliminaire du théorème de convergence monotone, fondamental, qui sera énoncé plus loin.

Proposition III.7.15. (••) Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré, f une fonction mesurable de X dans $[0, +\infty]$, et (f_n) une suite de fonctions de \mathcal{E}^+ (fonctions étagées positives). On suppose que (f_n) est croissante, c'est-à-dire que $(f_n(x))$ est une suite croissante pour tout x de X , et que f_n converge simplement vers f , c'est-à-dire que

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(x) = f(x) \quad \forall x.$$

L'intégrale de f est alors la limite des intégrales des f_n :

$$\int_X f d\mu = \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_X f_n d\mu.$$

Démonstration. On a de façon évidente

$$\int_X f_1 d\mu \leq \int_X f_2 d\mu \leq \dots \leq \int_X f d\mu,$$

d'où l'on déduit que la limite de $\int f_n$ existe, et vérifie $\lim \int f_n d\mu \leq \int f d\mu \in [0, +\infty]$. Établissons maintenant l'inégalité inverse. L'intégrale de f étant (définition III.7.12) le supremum des intégrales $\int g$, pour g décrivant l'ensemble des fonctions de \mathcal{E}^+ inférieures à f , il suffit de montrer que pour toute fonction g de ce type, on a $\int g \leq \lim \int f_n$. Soit g une telle fonction de \mathcal{E}^+ , inférieure à f . On considère la fonction $g_n = \min(g, f_n)$. La suite (g_n) est croissante car (f_n) l'est, et g_n converge simplement vers g . On a donc, d'après la proposition III.7.11,

$$\int g d\mu = \lim_n \int g_n.$$

Or on a $g_n \leq f_n$ pour tout n , d'où l'on déduit que la limite ci-dessus est majorée par $\lim \int f_n$, d'où finalement

$$\int g d\mu \leq \lim_n \int f_n,$$

qui conclut la preuve. □

Proposition III.7.16. Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré, f et g deux fonctions mesurables de X dans $[0, +\infty]$, et $\alpha \geq 0$. On a

$$\int_X (\alpha f) d\mu = \alpha \int_X f d\mu, \quad \int_X (f + g) d\mu = \int_X f d\mu + \int_X g d\mu.$$

Démonstration. La première identité est conséquence directe de la définition. Pour l'identité sur la somme, on utilise la proposition III.7.6, qui assure l'existence de suite de fonctions étagées (f_n) et (g_n) croissantes qui convergent simplement vers f et g respectivement. La suite $f_n + g_n$ est également dans \mathcal{E}^+ , elle est croissante, et converge simplement vers $f + g$. On a

$$\int (f_n + g_n) = \int f_n + \int g_n$$

d'après la proposition III.7.10. On fait maintenant tendre n vers $+\infty$, pour obtenir grâce à la proposition III.7.15 que l'intégrale de la somme est la somme des intégrales. □

Intégrabilité des fonctions

Définition III.7.17. (Partie positive / négative d'une fonction (•))

Soit f une fonction d'un ensemble X dans \mathbb{R} . On appelle *partie positive* de f , et l'on note f^+ , la fonction qui à x associe $f^+(x) = \max(f(x), 0) = (f(x) + |f(x)|)/2$. La partie négative de f , notée f^- , est la partie positive de l'opposé de f , de telle sorte que l'on a

$$f = f^+ - f^-.$$

Définition III.7.18. (Intégrabilité (•))

Soit f une fonction mesurable de (X, \mathcal{A}, μ) dans $\overline{\mathbb{R}}$. On dit que f est intégrable si $\int f^+$ et $\int f^-$ sont finies. On définit alors l'intégrale de f comme

$$\int f d\mu = \int f^+ d\mu - \int f^- d\mu.$$

Si une seule des deux quantités $\int f^+$ et $\int f^-$ est finie, on dit que l'intégrale existe, et prend la valeur $-\infty$ si $\int f^+$ est finie, et $+\infty$ dans le cas contraire.

Si l'espace de départ est \mathbb{R}^d , on dira simplement que f est intégrable au sens de Lebesgue.

Exercice III.7.3. On note g la fonction $\sin(x)/x$ sur \mathbb{R}_+ .

a) Que peut-on dire de l'intégrale généralisée de g entre 0 et $+\infty$?

b) La fonction g est-elle intégrable sur $]0, +\infty[$? (Correction page 188)

Proposition III.7.19. Soit f une fonction mesurable de (X, \mathcal{A}, μ) dans $\overline{\mathbb{R}}$. Alors f est intégrable si et seulement si $|f|$ l'est, et l'on a

$$\left| \int f d\mu \right| \leq \int |f| d\mu.$$

Démonstration. Si f est intégrable, alors les intégrales de f^+ et f^- sont finies, l'intégrale de $f^+ + f^- = |f|$ est donc finie. Inversement, l'intégrabilité de $|f| = f^+ + f^-$ assure l'intégrabilité de f^+ et f^- . On a

$$\left| \int f d\mu \right| = \left| \int f^+ d\mu - \int f^- d\mu \right| \leq \int f^+ d\mu + \int f^- d\mu$$

qui est égal à $\int |f| d\mu$. \square

Proposition III.7.20. (•) Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré, f et g deux fonctions mesurables de X dans $\overline{\mathbb{R}}$. On suppose que f et g sont égales presque partout, alors les fonctions sont indiscernables du point de vue de l'intégration, c'est-à-dire que f est intégrable si et seulement si g l'est, et alors $\int_A f = \int_A g$ pour tout $A \in \mathcal{A}$.

Démonstration. Si f et g s'identifient presque partout, il en est de même de leurs parties positives et négatives. La propriété est donc conséquence directe de la proposition III.7.14. \square

Proposition III.7.21. Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré et f une fonction intégrable à valeurs dans $[0, +\infty]$. Pour tout $t \in]0, +\infty[$ on introduit $A_t = \{x, f(x) \geq t\}$. On a

$$\mu(A_t) \leq \frac{1}{t} \int_{A_t} f(x) d\mu \leq \frac{1}{t} \int_X f(x) d\mu.$$

Démonstration. On a $0 \leq t \mathbb{1}_{A_t} \leq f \mathbb{1}_{A_t} \leq f$, d'où

$$t\mu(A_t) \leq \int_{A_t} f(x) \leq \int_X f(x),$$

d'où l'on tire les inégalités annoncées en divisant par t . \square

Proposition III.7.22. Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré et f une fonction intégrable à valeurs dans $[-\infty, +\infty]$. Alors f est finie μ -presque partout, i.e.

$$\mu(\{x, |f(x)| = +\infty\}) = 0.$$

Démonstration. C'est une conséquence de la proposition III.7.21. On a effet pour tout $n \in \mathbb{N}$

$$\mu(\{x, |f(x)| = +\infty\}) \leq \mu(\{x, |f(x)| \geq n\}) \leq \frac{1}{n} \int_X |f| d\mu.$$

La quantité positive $\mu(\{x, |f(x)| = +\infty\})$ est donc majorée par des réels arbitrairement petits, elle est donc nulle. \square

III.7.4 Théorèmes fondamentaux

Nous pouvons maintenant démontrer le théorème de convergence monotone, qui constitue l'aboutissement des propositions III.7.11 et III.7.15.

Théorème III.7.23. (Convergence monotone (••))

Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré, f une fonction mesurable de X dans $[0, +\infty]$, et (f_n) une suite de fonctions également mesurables et positives. On suppose que

1. la suite $(f_n(x))$ est croissante pour presque tout x (voir définition III.3.7),
2. f_n converge simplement vers f , presque partout, c'est-à-dire que, pour presque tout x , $f(x) = \lim f_n(x)$.

L'intégrale de f est alors la limite des intégrales des f_n :

$$\int f d\mu = \lim_{n \rightarrow +\infty} \int f_n d\mu.$$

Démonstration. On suppose dans un premier temps que les propriétés de monotonie et de convergence ponctuelle sont vérifiées pour tout x dans X . La monotonie de l'intégrale (proposition III.7.16) assure que

$$\int f_1 d\mu \leq \int f_2 d\mu \leq \dots \leq \int f d\mu,$$

On a donc convergence de la suite $(\int f_n)$ vers un réel inférieur ou égal à $\int f$. Montrons maintenant l'inégalité inverse. Pour tout n , la fonction f_n peut être approchée inférieurement par une suite $(g_{n,j})_j$ dans \mathcal{E}^+ (voir proposition III.7.6, page 93). On considère que la suite approchante est construite selon le procédé proposé dans la preuve, de telle sorte que l'on a toujours $g_{n,j} \leq g_{m,j}$, pour tous $m \leq n$, tout j (voir remarque III.7.7, page 94). On définit maintenant la fonction $h_n = g_{n,n} \in \mathcal{E}^+$, qui est croissante par construction, et telle que $h_n(x) \leq f(x)$.

Montrons enfin la convergence de $h_n(x)$ vers $f(x)$. Pour tout $\varepsilon > 0$, il existe n tel que $f_n(x) \geq f(x) - \varepsilon$. Il existe $j \geq n$ tel que $g_{n,j}(x) \geq f_n(x) - \varepsilon$. On a donc

$$h_j(x) \geq g_{n,j}(x) \geq f_n(x) - 2\varepsilon,$$

d'où la convergence de $h_j(x)$ vers $f(x)$. D'après la proposition III.7.15, on a donc

$$\int f = \lim_n \int h_n \leq \lim_n \int f_n,$$

ce qui conclut la première partie de la preuve.

On suppose maintenant que les propriétés de croissance et de convergence simple ne sont vérifiées que presque partout : il existe un ensemble $A \in \mathcal{A}$, dont le complémentaire est de mesure nulle, et sur lequel les propriétés sont vérifiées. La suite $f_n \mathbb{1}_A$ (qui met à 0 toutes les valeurs sur A^c) vérifie les hypothèses vis-à-vis de la fonction cible $f \mathbb{1}_A$. On a donc, d'après ce qui précède, convergence de la suite des intégrales vers l'intégrale de f . Or, comme $f_n \mathbb{1}_A$ s'identifie à f_n presque partout, de même pour $f \mathbb{1}_A$ et f , les intégrales sont les mêmes (d'après la proposition III.7.14), ce qui conclut la preuve. \square

Lemme III.7.24. (Fatou)

Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré et (f_n) une suite de fonctions mesurables de X dans $[0, +\infty]$. On a

$$\int \liminf_n f_n \, d\mu \leq \liminf_n \int f_n \, d\mu.$$

Démonstration. Pour tout n on définit g_n par $g_n(x) = \inf_{k \geq n} f_k(x)$. D'après la proposition III.7.2, chacune de ces fonctions est mesurable. La suite des g_n , croissante, et converge simplement vers $\liminf_n f_n$ par définition de la \liminf .

D'après le théorème de convergence monotone III.7.23, on a donc

$$\int \liminf_n f_n = \lim_n \int g_n \leq \liminf_n \int f_n$$

car $g_n \leq f_n$ pour tout n . Noter qu'il s'agit bien d'une \liminf dans le membre de droite, car, la suite f_n n'ayant pas de propriété de monotonie, la suite $\int f_n$ peut ne pas converger. \square

Théorème III.7.25. (Convergence dominée)

Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré, g une fonction intégrable de X dans $[0, +\infty]$, et (f_n) une suite de fonctions mesurables de X dans $[-\infty, +\infty]$. On suppose

$$f(x) = \lim_n f_n(x) \quad \text{pour presque tout } x,$$

et que, pour tout n ,

$$|f_n(x)| \leq g(x)$$

pour presque tout x dans X . Alors les fonctions f et f_n pour tout n sont intégrables sur X , et l'on a

$$\lim \int |f - f_n| \, d\mu = 0,$$

d'où en particulier $\lim \int f_n = \int f$.

Démonstration. Il existe un ensemble A dans \mathcal{A} , dont le complémentaire est de mesure nulle¹⁶, tel que toutes les propriétés soient vérifiées. Pour tout x dans A , on a $|f_n(x)| \leq g(x)$ et, par passage à la limite, $|f(x)| \leq g(x)$. On a donc $\int |f_n| \leq \int g < +\infty$ et $\int |f| \leq \int g < +\infty$, qui exprime l'intégrabilité de f et des f_n . On a par ailleurs $|f_n - f| \leq |f_n| + |f| \leq 2g$, qui est donc intégrable pour tout n . On applique le lemme de Fatou III.7.24 à la suite de fonctions positives $(2g - |f_n - f|)$:

$$\int \liminf (2g - |f_n - f|) \leq \liminf \int (2g - |f_n - f|),$$

d'où l'on déduit, par linéarité de l'intégrale (et prenant garde de transformer les \liminf en \limsup quand on fait sortir le signe $-$),

$$\limsup \int |f_n - f| \leq \int \limsup |f_n - f|.$$

Or, comme f_n converge vers f sur A , la fonction $\limsup |f_n - f|$ est identiquement nulle presque partout, d'où la nullité de son intégrale, ce qui exprime la convergence de $\int |f_n - f|$ vers 0. \square

Exercice III.7.4. Soit f une fonction de \mathbb{R} dans \mathbb{R} , intégrable. Décrire le comportement de la suite

$$u_n = \int_{\mathbb{R}} f(x) \cos(x)^n \, d\lambda.$$

(Correction page 188)

16. Chacune des propriétés énoncées est vraie sur un ensemble dont le complémentaire est de mesure nulle. On exclut ici la réunion de tous ces ensembles sur lesquels les propriétés sont vérifiées, comme il s'agit d'une réunion dénombrable, cet ensemble reste de mesure nulle.

III.8 Intégrales multiples

Définition III.8.1. (Rectangles)

Soient (X_1, \mathcal{A}_1) et (X_2, \mathcal{A}_2) deux espaces mesurables. On appelle *rectangle* de $X_1 \times X_2$ un ensemble de la forme $A_1 \times A_2$, avec $A_1 \in \mathcal{A}_1$, $A_2 \in \mathcal{A}_2$, et l'on note \mathcal{R} l'ensemble de ces rectangles.

Proposition III.8.2. Soient (X_1, \mathcal{A}_1) et (X_2, \mathcal{A}_2) deux espaces mesurables. L'ensemble \mathcal{R} des rectangles est un π -système (définition III.2.17), c'est à dire qu'il est stable par intersection finie.

Démonstration. Pour tous rectangles $A_1 \times A_2$ et $A'_1 \times A'_2$ de $\mathcal{A}_1 \times \mathcal{A}_2$, on a

$$(A_1 \times A_2) \cap (A'_1 \times A'_2) = \left(\underbrace{A_1 \cap A'_1}_{\in \mathcal{A}_1} \right) \times \left(\underbrace{A_2 \cap A'_2}_{\in \mathcal{A}_2} \right),$$

qui appartient $\mathcal{A}_1 \times \mathcal{A}_2$. □

Définition III.8.3. (Tribu-produit)

Soient (X_1, \mathcal{A}_1) et (X_2, \mathcal{A}_2) deux espaces mesurables. On appelle *tribu-produit* de \mathcal{A}_1 et \mathcal{A}_2 la tribu de $X_1 \times X_2$ engendrée par les rectangles. On la note $\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$.

Définition III.8.4. (Sections)

Soient X_1 et X_2 deux ensembles et $E \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$. Pour $x_1 \in X_1$, on définit la *section* associée à X_1 par

$$E_{x_1} = \{x_2 \in X_2, (x_1, x_2) \in E\}$$

On définit de la même manière, pour $x_2 \in X_2$, la section $E^{x_2} = \{x_1 \in X_1, (x_1, x_2) \in E\}$.

Proposition III.8.5. Soient (X_1, \mathcal{A}_1) et (X_2, \mathcal{A}_2) deux espaces mesurables. Soit $E \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$. Toute section E_{x_1} est dans \mathcal{A}_2 , et toute section E^{x_2} est dans \mathcal{A}_1 .

Démonstration. Soit $x_1 \in X_1$. On définit \mathcal{F} comme l'ensemble des parties E de $X_1 \times X_2$ telles que E_{x_1} est élément de \mathcal{A}_2 . Pour tout rectangle $E = A_1 \times A_2$, avec $A_i \in \mathcal{A}_i$, on a soit $E_{x_1} = \emptyset$ (si $x_1 \notin A_1$), soit $E_{x_1} = A_2$ (si $x_1 \in A_1$), d'où l'on déduit que \mathcal{F} contient tous les rectangles $A_1 \times A_2$. On a par ailleurs, pour toute partie E de l'espace produit,

$$(E^c)_{x_1} = (E_{x_1})^c$$

et, pour toute collection (E_n) ,

$$\left(\bigcup E_n \right)_{x_1} = \bigcup (E_n)_{x_1},$$

d'où l'on déduit que \mathcal{F} est stable par complémentarité et par union dénombrable. Il s'agit donc d'une tribu, qui contient donc la tribu engendrée par les rectangles, qui est $\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$. Pour tout $E \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$, on a donc $E_{x_1} \in \mathcal{A}_2$. On démontre de la même manière que toute section E^{x_2} d'un ensemble $E \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$ est dans \mathcal{A}_1 . □

Définition III.8.6. (Section d'une application)

Soit f une fonction définie sur un espace produit $X_1 \times X_2$. On note f_{x_1} la fonction (appelée *section*) définie sur X_2 par

$$f_{x_1}(x_2) = f(x_1, x_2).$$

On définit de la même manière $x_1 \mapsto f^{x_2}(x_1) = f(x_1, x_2)$.

Proposition III.8.7. Soit f une application $\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$ – mesurable à valeurs dans $[-\infty, +\infty]$, alors pour tout $x_1 \in X_1$, la section f_{x_1} est \mathcal{A}_2 – mesurable, et pour tout $x_2 \in X_2$, la section f_{x_2} est \mathcal{A}_1 – mesurable.

Démonstration. Pour tout $x_1 \in X_1$, tout $A_2 \in \mathcal{A}_2$, tout borélien D de $\overline{\mathbb{R}}$, on a

$$(f_{x_1})^{-1}(D) = (f^{-1}(D))_{x_1},$$

Or $f^{-1}(D) \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$ d'après l'hypothèse de mesurabilité de f , et donc $(f^{-1}(D))_{x_1} \in \mathcal{A}_2$ d'après la proposition III.8.5. On montre de la même manière que, pour tout $x_2 \in X_2$, la section f_{x_2} est \mathcal{A}_1 – mesurable. \square

Proposition III.8.8. Soient $(X_1, \mathcal{A}_1, \mu_1)$ et $(X_2, \mathcal{A}_2, \mu_2)$ deux espaces mesurés, tels que μ_1 et μ_2 sont σ – finies. Pour tout $E \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$, les applications

$$x_1 \mapsto \mu_2(E_{x_1}) \text{ et } x_2 \mapsto \mu_1(E^{x_2})$$

sont respectivement \mathcal{A}_1 – mesurable et \mathcal{A}_2 – mesurable.

Démonstration. On suppose dans un premier temps que μ_2 est finie. D'après la proposition III.8.5, pour tout $x_1 \in X_1$, tout $E \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$. La section E_{x_1} est dans \mathcal{A}_2 , la quantité $\mu_2(E_{x_1})$ est donc bien définie. On introduit l'ensemble \mathcal{D} des éléments E de $\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$ tels que la fonction $x_1 \mapsto \mu_2(E_{x_1})$ est \mathcal{A}_1 – mesurable. Nous allons montrer que \mathcal{D} est une classe monotone qui contient le π – système des rectangles, dont nous déduirons que \mathcal{D} est la tribu produit toute entière. Pour tout rectangle $E = A_1 \times A_2$, cette fonction s'écrit

$$\mu_2(E_{x_1}) = \mu_2(A_2) \mathbf{1}_{A_1}(x_1),$$

elle est donc μ_1 – mesurable. En particulier, $X_1 \times X_2 \in \mathcal{D}$. Si maintenant E et F sont dans \mathcal{D} , avec $E \subset F$, on a

$$\mu_2((F \setminus E)_{x_1}) = \mu_2(F_{x_1}) - \mu_2(E_{x_1}),$$

d'où la mesurabilité de $x_1 \mapsto \mu_2((F \setminus E)_{x_1})$. Si maintenant (E_n) est une suite croissante d'éléments de \mathcal{D} , on a

$$\mu_2\left(\left(\bigcup E_n\right)_{x_1}\right) = \lim \mu_2((E_n)_{x_1}) = \sup \mu_2((E_n)_{x_1}),$$

qui est mesurable d'après la proposition III.7.2, page 91. L'ensemble \mathcal{D} est donc une classe monotone, qui contient le π – système \mathcal{R} des rectangles. Il contient donc la tribu engendrée par \mathcal{R} , qui est $\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$ (définition III.8.3). Or \mathcal{D} a été défini comme l'ensemble des parties E telles que $x_1 \mapsto \mu_2(E_{x_1})$ est \mathcal{A}_1 – mesurable. Cette propriété est donc vraie pour tout $E \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$. On montre symétriquement que $x_2 \mapsto \mu_1(E^{x_2})$ est \mathcal{A}_2 – mesurable pour tout $E \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$.

Si maintenant μ_2 est σ – finie, on introduit une partition (D_n) de X_2 , constituée de parties de mesure finie (voir proposition III.3.4). Chacune des mesures μ_2^n définie par $\mu_2^n(A) = \mu_2(A \cap D_n)$ est donc finie. D'après ce qui précède, la fonction $x_1 \mapsto \mu_2^n(E_{x_1})$ est μ_1 – mesurable, d'où

$$x_1 \mapsto \mu_2(E_{x_1}) = \sum_{n=0}^{+\infty} \mu_2^n(E_{x_1})$$

est mesurable. On démontre de la même manière la propriété symétrique. \square

Théorème III.8.9. (Mesure – produit)

Soient $(X_1, \mathcal{A}_1, \mu_1)$ et $(X_2, \mathcal{A}_2, \mu_2)$ deux espaces mesurés, avec μ_1 et μ_2 des mesures que l'on suppose σ – finies. Il existe une unique mesure sur $(X_1 \times X_2, \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2)$, appelée *mesure produit* de μ_1 et μ_2 , notée $\mu_1 \otimes \mu_2$, telle que

$$(\mu_1 \otimes \mu_2)(A_1 \times A_2) = \mu_1(A_1)\mu_2(A_2),$$

pour tous $A_1 \in \mathcal{A}_1$ et $A_2 \in \mathcal{A}_2$. Cette mesure vérifie en outre, pour tout $E \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$,

$$(\mu_1 \otimes \mu_2)(E) = \int_{X_1} \mu_2(E_{x_1}) d\mu_1(x_1) = \int_{X_2} \mu_1(E^{x_2}) d\mu_2(x_2).$$

Démonstration. D'après la proposition III.8.8, les fonctions $x_1 \mapsto \mu_2(E_{x_1})$ et $x_2 \mapsto \mu_1(E^{x_2})$ sont respectivement \mathcal{A}_1 – mesurable et \mathcal{A}_2 – mesurable. On peut ainsi définir deux fonctions de $\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$ dans \mathbb{R}_+ comme suit

$$(\mu_1 \otimes \mu_2)_1(E) = \int_{X_1} \mu_2(E_{x_1}) d\mu_1(x_1), \quad (\mu_1 \otimes \mu_2)_2(E) = \int_{X_2} \mu_1(E^{x_2}) d\mu_2(x_2).$$

On vérifie immédiatement que ce sont bien des mesures sur la tribu-produit $\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$. Ces mesures prennent les mêmes valeurs sur les rectangles : pour tous $A_1 \in \mathcal{A}_1$, $A_2 \in \mathcal{A}_2$,

$$(\mu_1 \otimes \mu_2)_1(A_1 \times A_2) = \mu_1(A_1)\mu_2(A_2) = (\mu_1 \otimes \mu_2)_2(A_1 \times A_2).$$

Elles s'identifient donc sur l'ensemble \mathcal{R} des rectangles, qui constituent un π – système d'après la proposition III.8.2. La mesure μ_1 étant σ – finie, X_1 s'écrit comme union croissante dénombrable d'ensembles A_n^1 de mesure finie, de même X_2 est réunion croissante des A_n^2 , avec $\mu_2(A_n^2) < +\infty$ pour tout n . L'union des $C_n = A_n^1 \times A_n^2$, recouvre donc $X_1 \times X_2$, et l'on peut utiliser le corollaire III.3.13, page 77, qui assure que ces mesures s'identifient sur la tribu engendrée par \mathcal{R} , qui est par définition la tribu-produit $\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$. \square

Exercice III.8.1. a) Soient f_1 et f_2 deux applications mesurables de $(X_1, \mathcal{A}_1, \mu_1)$ et $(X_2, \mathcal{A}_2, \mu_2)$ vers $(X'_1, \mathcal{A}'_1, \mu'_1)$ et $(X'_2, \mathcal{A}'_2, \mu'_2)$, respectivement. Montrer que l'application

$$F : (x_1, x_2) \mapsto (f_1(x_1), f_2(x_2))$$

est mesurable pour les tribus produits sur les espaces d'arrivée et de départ.

b) On considère maintenant f_1 et f_2 deux applications mesurables de (X, \mathcal{A}, μ) vers $(X'_1, \mathcal{A}'_1, \mu'_1)$ et $(X'_2, \mathcal{A}'_2, \mu'_2)$, respectivement. Montrer que l'application

$$G : x \in X \mapsto (f_1(x), f_2(x))$$

est mesurable pour les tribus produits sur les espaces d'arrivée et de départ. (Correction page 188)

Théorème III.8.10. (Fubini – Tonelli)

Soient μ_1 et μ_2 deux mesures σ – finies sur les espaces mesurables (X_1, \mathcal{A}_1) et (X_2, \mathcal{A}_2) , respectivement. Soit f une fonction $\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$ – mesurable de (X_1, X_2) dans $[0, +\infty]$. Alors, pour μ_1 – presque tout x_1 , la section f_{x_1} est \mathcal{A}_2 – mesurable sur X_2 et pour μ_2 – presque tout x_2 , la section f^{x_2} est \mathcal{A}_1 – mesurable sur X_1 , et l'on a

$$\begin{aligned} \int_{X_1 \times X_2} f(x_1, x_2) d(\mu_1 \otimes \mu_2) &= \int_{X_1} \left(\int_{X_2} f_{x_1}(x_2) d\mu_2(x_2) \right) d\mu_1(x_1) \\ &= \int_{X_2} \left(\int_{X_1} f^{x_2}(x_1) d\mu_1(x_1) \right) d\mu_2(x_2). \end{aligned}$$

Démonstration. On considère dans un premier temps le cas où f est la fonction indicatrice d'une partie $E \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$. Les sections f_{x_1} et f^{x_2} sont alors les fonctions indicatrices de E_{x_1} et E^{x_2} , respectivement :

$$f_{x_1}(x_2) = f(x_1, x_2) = \mathbf{1}_E(x_1, x_2) = \mathbf{1}_{E_{x_1}}(x_2), \quad f^{x_2}(x_1) = \mathbf{1}_{E^{x_2}}(x_1).$$

elles sont donc respectivement \mathcal{A}_2 – mesurable et \mathcal{A}_1 – mesurable d'après la proposition III.8.8, et l'on a

$$\int_{X_2} f_{x_1}(x_2) d\mu_2(x_2) = \mu_2(E_{x_1}) \quad \text{et} \quad \int_{X_1} f^{x_2}(x_1) d\mu_1(x_1) = \mu_1(E^{x_2}).$$

On a d'après le théorème III.8.9, qui définit la mesure-produit,

$$\begin{aligned} \int_{X_1} \left(\int_{X_2} f_{x_1} d\mu_2(x_2) \right) d\mu_1(x_1) &= \int_{X_1} \mu_2(E_{x_1}) d\mu_1(x_1) \\ &= (\mu_1 \otimes \mu_2)(E) \\ &= \int_{X_2} \mu_1(E^{x_2}) d\mu_2(x_2) \\ &= \int_{X_2} \left(\int_{X_1} f^{x_2}(x_1) d\mu_1(x_1) \right) d\mu_2(x_2). \end{aligned}$$

La propriété est donc vérifiée pour les fonctions indicatrices d'éléments de $\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$. Elle donc vérifiée, par linéarité de l'intégrale, pour les fonctions étagées. Or toute fonction mesurable sur $\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$ est limite croissante d'une suite de fonctions étagées (proposition III.7.6, page 93). Pour toute fonction étagée g sur $\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$, la section g_{x_1} est également étagée :

$$g(x_1, x_2) = \sum \alpha_i \mathbb{1}_{C_i}(x_1, x_2), \quad g_{x_1}(x_2) = \sum \alpha_i \mathbb{1}_{(C_i)_{x_1}}(x_2).$$

Pour toute suite croissante de telles fonctions, les sections sont également croissantes, et la convergence simple implique la convergence de toute section vers la section correspondante de la limite. La proposition III.7.2, page 91, assure la mesurabilité des sections. Le théorème III.7.23 de convergence monotone assure la convergence des intégrales, ce qui conclut la preuve. \square

Théorème III.8.11. (Fubini – Lebesgue)

Soient μ_1 et μ_2 deux mesures σ -finies sur les espaces mesurables (X_1, \mathcal{A}_1) et (X_2, \mathcal{A}_2) , respectivement. Soit f une fonction $\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$ -mesurable de (X_1, X_2) dans $[-\infty, +\infty]$. On suppose que f est intégrable pour la mesure produit $\mu_1 \otimes \mu_2$. Alors

- (i) Pour μ_1 -presque tout x_1 , la section f_{x_1} est μ_2 -intégrable sur X_2 et pour μ_2 -presque tout x_2 , la section f^{x_2} est μ_1 -intégrable sur X_1 ;
- (ii) Les fonctions

$$x_1 \in X_1 \mapsto I_f^1(x_1) = \begin{cases} \int_{X_2} f_{x_1}(x_2) d\mu_2 & \text{si } f_{x_1} \text{ est } \mu_2\text{-intégrable} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

et

$$x_2 \in X_2 \mapsto I_f^2(x_2) = \begin{cases} \int_{X_1} f^{x_2}(x_1) d\mu_1 & \text{si } f^{x_2} \text{ est } \mu_1\text{-intégrable} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

sont respectivement μ_1 -intégrable et μ_2 -intégrable.

- (iii) On a

$$\int_{X_1 \times X_2} f(x_1, x_2) d(\mu_1 \otimes \mu_2) = \int_{X_1} I_f^1(x_1) d\mu_1 = \int_{X_2} I_f^2(x_2) d\mu_2.$$

Démonstration. Soient f^+ et f^- les parties positive et négative de f . D'après la proposition III.8.7, les sections $(f^+)_{x_1}$, $(f^-)_{x_1}$ sont \mathcal{A}_2 mesurables. D'après le théorème III.8.10, les fonctions

$$x_1 \mapsto \int_{X_2} (f^+)_{x_1} d\mu_2 \quad \text{et} \quad x_1 \mapsto \int_{X_2} (f^-)_{x_1} d\mu_2$$

sont \mathcal{A}_1 -mesurables et μ_1 -intégrables. D'après la proposition III.7.22, ces fonctions sont donc finies μ_1 presque partout. La section f_{x_1} est donc intégrable pour presque tout x_1 . Soit N l'ensemble des x_1 tels que l'une ou l'autre des fonctions ci-dessus est infinie. L'ensemble N est dans \mathcal{A}_1 car

$$N = \left(\bigcap_n \left\{ x_1, \int_{X_2} (f^+)_{x_1} d\mu_2 > n \right\} \right) \cup \left(\bigcap_n \left\{ x_1, \int_{X_2} (f^-)_{x_1} d\mu_2 > n \right\} \right).$$

la fonction I_f^1 vaut 0 sur N , et prend la valeur

$$\int_{X_2} (f^+)_{x_1} d\mu_2 - \int_{X_2} (f^-)_{x_1} d\mu_2$$

sur son complémentaire. La fonction I_f^1 est donc μ_1 -intégrable. On a donc, d'après le théorème III.8.10 et la proposition III.7.20, page 99,

$$\begin{aligned} \int_{X_1 \times X_2} f d(\mu_1 \otimes \mu_2) &= \int_{X_1 \times X_2} f^+ d(\mu_1 \otimes \mu_2) - \int_{X_1 \times X_2} f^- d(\mu_1 \otimes \mu_2) \\ &= \int_{X_1} \int_{X_2} (f^+)_{x_1} d\mu_2 - \int_{X_1} \int_{X_2} (f^-)_{x_1} d\mu_2 = \int_{X_1} I_f^1 d\mu_1. \end{aligned}$$

La même démarche appliquée aux sections $(f^+)^{x_2}$ et $(f^-)^{x_2}$ permet de conclure. \square

III.9 Changements de variable

Si l'on considère une application f d'un espace mesurable (X, \mathcal{A}) vers un ensemble X' , la proposition III.2.10, page 70 définit la *tribu image* de \mathcal{A} comme

$$\mathcal{A}' = \{A' \subset X', f^{-1}(A') \in \mathcal{A}\}.$$

On peut définir de façon analogue la *mesure image* d'une mesure par une application :

Proposition III.9.1. (Mesure image)

Soit f une application d'un espace mesuré (X, \mathcal{A}, μ) dans un ensemble X' . Alors

$$\mu' : \mathcal{A}' = f_{\#}\mathcal{A} \longmapsto \mathbb{R}_+$$

définie par

$$\mu'(A') = \mu(f^{-1}(A')),$$

est une mesure, appelée *mesure image* de μ par f . Ce transport conserve la masse totale.

Démonstration. On a bien $\mu'(\emptyset) = 0$, et

$$\mu'\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A'_n\right) = \mu\left(f^{-1}\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A'_n\right)\right) = \mu\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} f^{-1}(A'_n)\right) = \sum_{n=0}^{+\infty} \mu(f^{-1}(A'_n)).$$

On a par ailleurs $\mu'(X') = \mu(f^{-1}(X')) = \mu(X)$. □

Dans le cadre des deux propositions précédentes, on peut écrire une formule abstraite de changement de variable.

Proposition III.9.2. Soient (X, \mathcal{A}) et (X', \mathcal{A}') deux espaces mesurables, et $T : X \longrightarrow X'$ une application mesurable de X vers X' .

(i) Pour toute fonction f de X' dans $[0, +\infty]$, mesurable,

$$\int_{X'} f(y) d(T_{\#}\mu)(y) = \int_X f \circ T(x) d\mu(x)$$

(ii) Pour toute fonction f de X' dans $\overline{\mathbb{R}}$, mesurable, la fonction f est $T_{\#}\mu$ -intégrable si et seulement si la fonction $f \circ T$ est μ -intégrable, et la formule ci-dessus est alors valable.

Démonstration. Si f est une fonction étagée (voir définition III.7.5, page 93), (i) est une conséquence directe de la définition de la mesure image. Dans le cas général d'une fonction mesurable, on peut approcher f par une suite croissante (f_n) de fonctions étagées (proposition III.7.6, page 93). Alors $(f_n \circ T)$ est une famille croissante de fonctions étagées convergeant vers $f \circ T$, et on peut passer à la limite grâce au théorème de convergence monotone (théorème III.7.23 page 100).

Pour (ii), on applique simplement ce qui précède à f^+ et f^- . □

Lorsqu'il s'agit d'une application régulière (en un sens précisé ci-dessous) entre parties de \mathbb{R}^d , on dispose d'une formule de changement de variable plus explicite, qui fait intervenir la différentielle de l'application.

Proposition III.9.3. Soient U un ouvert de \mathbb{R}^d et T un C^1 -difféomorphisme (définition II.3.7, page 51) entre U et $V \subset \mathbb{R}^d$.

(i) Pour tout borélien B de U

$$\lambda(T(B)) = \int_B |\det J_T| \, d\lambda,$$

où $|\det J_T|$ est la valeur absolue du déterminant de la matrice jacobienne de T .

(ii) Pour toute fonction f de V dans $\overline{\mathbb{R}}$, mesurable, alors f est intégrable sur V si et seulement si $|\det J_T| f \circ T$ est intégrable sur U , et l'on a alors

$$\int_{T(B)} f(y) \, d\lambda(y) = \int_B f(T(x)) |\det J_T| \, d\lambda.$$

III.10 Les espaces L^p

Nous introduisons dans cette section les espaces L^p qui jouent un rôle central dans un très grand nombre d'applications. Ce sont des espaces naturels pour décrire des champs de quantités physiques intensives sur des domaines, typiquement l'espace physique \mathbb{R}^d ou un ouvert Ω de cet espace. La construction pouvant se faire en toute généralité, nous la proposons sur un espace mesuré (X, \mathcal{A}, μ) quelconque, mais on pourra instancier cette construction abstraite en remplaçant (X, \mathcal{A}, μ) par $(\Omega, \mathcal{B}, \lambda)$, où Ω est un ouvert non vide de \mathbb{R}^d (on parle de *domaine*), \mathcal{B} la tribu des boréliens, et λ la mesure de Lebesgue.

Remarques préliminaires : espaces fonctionnels et modélisation

La construction décrite dans les sections précédentes permet d'intégrer des variables intensives contre la mesure sous-jacente, pour obtenir une variable extensive afférente au domaine sur lequel on a intégré. Prenons le cas de la mesure de Lebesgue qui, conformément à la terminologie employée au début de ce chapitre, correspond à une mesure de type "volume". Si l'on intègre sur un domaine une fonction correspondant à la densité locale d'une certaine substance, on obtient la masse contenue dans le domaine considéré. La mesure volume peut ainsi être vue comme une capacité à accueillir de la masse. Pour un système fermé, la conservation de la masse se traduira par la conservation d'une certaine norme, qui correspond au cas $p = 1$, de sorte que l'espace L^1 introduit constituera un cadre naturel à cette description. Dans un contexte thermique, on peut considérer cette mesure uniforme comme prenant une certaine valeur fixe de type capacité calorifique. Lorsque l'on intègre sur un domaine un champ de température contre cette mesure, on obtient la quantité de chaleur contenue dans le domaine. La mesure de départ peut ainsi être vue comme une capacité locale à emmagasiner de l'énergie thermique. Noter que si le milieu est hétérogène, cette capacité peut varier d'un endroit à l'autre. Dans ce contexte, si l'on considère un problème d'évolution pour un système fermé (adiabatique), le cas $p = 1$ sera également adapté pour décrire ces phénomènes.

Considérons maintenant une mesure de type "masse", toujours selon la terminologie employée au début du chapitre. Si l'on considère que la mesure correspond à la distribution dans l'espace d'une matière pesante en mouvement, on peut intégrer la quantité vectorielle *Vitesse* contre cette mesure, pour obtenir la quantité de mouvement. Là encore le cas $p = 1$ constituera un cadre naturel, la conservation de la quantité de mouvement assurant la préservation d'une quantité définie ci-après comme la norme L^1 associée à la distribution de masse en mouvement. Si l'on intègre une autre variable intensive, scalaire celle-là, égale à la moitié du module de la vitesse au carré, le résultat de l'intégration sur un domaine correspond à l'énergie cinétique emmagasinée dans le domaine en question. Dans ce contexte, c'est l'espace L^2 qui s'impose comme cadre naturel. On notera que les considérations précédentes permettent de concevoir la mesure sous-jacente (distribution de masse dans l'espace) comme une *capacité* à accueillir de la quantité de mouvement, ou une capacité à accueillir de l'énergie cinétique.

III.10.1 L'espace $L^\infty(X)$

Définition III.10.1. Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré. On note ¹⁷ $\tilde{L}^\infty(X)$ l'ensemble des fonctions *essentiellement bornées*, c'est à dire des fonctions f qui sont \mathcal{A} -mesurables, et telles qu'il existe $C \in \mathbb{R}_+$ vérifiant

$$|f(x)| \leq C \quad \text{pour presque tout } x.$$

Pour une telle fonction, on définit

$$\|f\|_\infty = \inf \{C, |f| \leq C \text{ p.p.}\}, \quad (\text{III.10.1})$$

appelé *supremum essentiel* de la fonction f sur l'espace mesuré X . On définit l'espace $L^\infty(X)$ à partir de $\tilde{L}^\infty(X)$ en identifiant les fonctions égales presque partout, c'est-à-dire que $L^\infty(X)$ est l'espace des classes d'équivalence de $\tilde{L}^\infty(X)$ pour la relation d'équivalence

$$f \mathcal{R} g \iff f = g \text{ p.p.}$$

On vérifie immédiatement que la quantité $\|f\|_\infty$ (que l'on appellera *norme* de f) est bien définie pour une classe, puisque la valeur est la même pour deux fonctions de $\tilde{L}^\infty(X)$ égales presque partout.

Remarque III.10.2. On prendra garde au fait que, dans la pratique courante, il subsiste une certaine ambiguïté entre $\tilde{L}^\infty(X)$ et $L^\infty(X)$. En particulier, lorsque l'on écrit $f \in L^\infty(X)$, on considère parfois f comme une fonction au sens usuel, ce qui peut amener à écrire pour deux fonctions f et g de cet espace que f et g sont égales presque partout, ce qui n'a a priori pas de sens s'il s'agit de *classes* de fonctions (on devrait écrire simplement $f = g$ si l'on considérait les classes). En revanche lorsque l'on établit des propriétés de cet espace, il s'agit bien de l'espace des classes. Nous verrons en particulier que $\|\cdot\|_\infty$ définit une *norme* sur $L^\infty(X)$, ce qui n'est vrai que si l'on considère l'espace des classes d'équivalence. Cette quantité n'est en effet pas une norme sur $\tilde{L}^\infty(X)$: dès que \mathcal{A} admet des ensembles de mesure nulle, il existe des fonctions qui annulent $\|\cdot\|_\infty$ (toutes les fonctions nulles presque partout).

Lemme III.10.3. Pour tout $f \in L^\infty(X)$, on a

$$|f(x)| \leq \|f\|_\infty \quad \text{p.p.}$$

Démonstration. Il existe une suite (C_n) convergeant vers $\|f\|_\infty$ telle que

$$|f(x)| \leq C_n \quad \forall x \in X \setminus E_n,$$

avec $E_n \in \mathcal{A}$ négligeable. On note E l'union des E_n , qui est aussi négligeable, et l'on a, pour tout n ,

$$|f(x)| \leq C_n \quad \forall x \in X \setminus E,$$

d'où $|f(x)| \leq \|f\|_\infty$ pour tout x dans $X \setminus E$. □

Proposition III.10.4. L'ensemble $L^\infty(X)$ est un espace vectoriel, et $\|\cdot\|_\infty$ est une norme sur cet espace.

Démonstration. La structure vectorielle de $L^\infty(X)$ est immédiate d'après la définition. On a $\|f\|_\infty = 0$ si et seulement si f est nulle presque partout, et la 1 – homogénéité est immédiate. Pour tous f et g dans L^∞ (plus précisément des représentants de leurs classes respectives dans L^∞), on a

$$|f(x) + g(x)| \leq |f(x)| + |g(x)| \leq \|f\|_\infty + \|g\|_\infty$$

presque partout. □

17. Nous omettrons dans la définition la référence explicite à la tribu \mathcal{A} et la mesure μ , pour alléger l'écriture.

Proposition III.10.5. L'espace $(L^\infty(X), \|\cdot\|_\infty)$ est un espace de Banach, c'est-à-dire un espace vectoriel normé complet.

Démonstration. Soit (f_n) une suite de Cauchy dans L^∞ . Pour tout $k \geq 1$, il existe N_k tel que,

$$\|f_m - f_n\|_\infty \leq \frac{1}{k} \quad \forall m, n \geq N_k,$$

ce qui signifie que, pour tous m, n plus grands que N_k , il existe $E_{m,n,k}$ négligeable tel que $|f_m(x) - f_n(x)| \leq 1/k$ sur $X \setminus E_{m,n,k}$. L'ensemble $E = \cup E_{m,n,k}$ est négligeable comme union dénombrable d'ensembles négligeables et, sur $X \setminus E$, la suite $(f_n(x))$ est de Cauchy, donc converge dans \mathbb{R} . En passant à la limite dans l'inégalité précédente, on obtient $|f_n(x) - f(x)| \leq 1/k$, d'où la convergence presque partout de f_n vers f , qui appartient à L^∞ , et qui est telle que $\|f_n - f\|_\infty \rightarrow 0$. \square

III.10.2 Les espaces $L^p(X)$, pour $p \in [1, +\infty[$

Définition III.10.6. Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré et $p \in [1, +\infty[$. On note $L^p(X)$ l'ensemble des fonctions f qui sont \mathcal{A} -mesurables et telles que $|f|^p$ est intégrable. On note

$$\|f\|_p = \left(\int_X |f|^p d\mu \right)^{1/p}.$$

Comme pour L^∞ , on définit en fait cet ensemble comme l'espace des classes d'équivalences obtenu en identifiant les fonctions égales presque partout. Comme précédemment, on prendra garde au fait que dans la pratique, lorsque l'on écrit $f \in L^p(X)$, on considère en fait f comme une fonction (un représentant de sa propre classe), voir remarque III.10.2.

Proposition III.10.7. (Inégalité de Hölder)

Soit $p \in [1, +\infty[$, $f \in L^p$, et $g \in L^{p'}$, où p' est l'exposant conjugué de p , tel que $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = 1$. On a alors $fg \in L^1$, avec

$$\|fg\|_{L^1} \leq \|f\|_{L^p} \|g\|_{L^{p'}}.$$

Démonstration. Soient $f \in L^p$ et $g \in L^{p'}$. D'après l'inégalité de Young (proposition IV.1.30, page IV.1.30) on a, pour tout $x \in X$,

$$|f(x)| |g(x)| \leq \frac{1}{p} |f(x)|^p + \frac{1}{p'} |f(x)|^{p'},$$

d'où $fg \in L^1$, et

$$\|fg\|_{L^1} \leq \frac{1}{p} \|f\|_{L^p}^p + \frac{1}{p'} \|f\|_{L^{p'}}^{p'}.$$

On obtient, en remplaçant f par λf (avec $\lambda > 0$) dans l'inégalité ci-dessus,

$$\|fg\|_{L^1} \leq \frac{\lambda^{p-1}}{p} \|f\|_{L^p}^p + \frac{1}{\lambda p'} \|f\|_{L^{p'}}^{p'}.$$

La fonction ci-dessus est convexe en λ , et tend vers $+\infty$ quand λ tend vers 0 et vers $+\infty$, elle est minimale pour $\lambda = \|f\|_{L^p}^{-1} \|f\|_{L^{p'}}^{p'/p}$, ce qui conclut la preuve. \square

Proposition III.10.8. L'ensemble $L^p(X)$ est un espace vectoriel, et $\|\cdot\|_p$ est une norme sur $L^p(X)$.

Démonstration. Pour tous f et g dans $L^p(X)$, tout $x \in X$, on a

$$|f(x) + g(x)|^p \leq (|f(x)| + |g(x)|)^p \leq (2 \max(|f(x)|, |g(x)|))^p \leq 2^p (|f(x)|^p + |g(x)|^p),$$

d'où $f + g \in L^p(X)$. On a par ailleurs, d'après la proposition III.7.16, $\lambda f \in L^p(X)$ pour tout $\lambda \in \mathbb{R}$.

L'inégalité triangulaire est une conséquence de l'inégalité de Hölder. En effet, pour tous f et g dans $L^p(X)$, on a

$$\int |f + g|^p = \int |f + g|^{p-1} |f + g| \leq \int |f + g|^{p-1} |f| + \int |f + g|^{p-1} |g|.$$

Or, si p' est l'exposant conjugué de p , on a $p'(p-1) = p$, d'où l'on déduit que la fonction $|f + g|^{p-1}$ est dans $L^{p'}(X)$. D'après l'inégalité de Hölder (proposition III.10.7), appliquée successivement aux deux intégrales du membre de droite ci-dessus, on a

$$\int |f + g|^p \leq \left(\int |f + g|^p \right)^{1/p'} \left(\int |f|^p \right)^{1/p} + \left(\int |f + g|^p \right)^{1/p'} \left(\int |g|^p \right)^{1/p}$$

d'où l'on déduit, en utilisant $1/p' = 1 - 1/p$, l'inégalité triangulaire (l'inégalité est trivialement vérifiée si $\int |f + g|^p = 0$). \square

Proposition III.10.9. Soit $p \in [1, +\infty[$. L'espace vectoriel normé $(L^p(X), \|\cdot\|_p)$ est complet.

Démonstration. Soit f_n une suite de Cauchy dans $L^p(X)$. Il suffit de montrer qu'il existe une sous-suite extraite convergente dans L^p , la caractère de Cauchy assurera la convergence de l'ensemble de la suite vers la même limite. La première étape consiste à extraire une sous-suite f_{n_k} telle que

$$\|f_{n_{k+1}} - f_{n_k}\|_{L^p} \leq \frac{1}{2^k}.$$

On procède de la façon suivante : il existe n_1 tel que $\|f_m - f_n\|_{L^p} \leq 1/2$ pour tous m et n plus grands que n_1 . Il existe ensuite un $n_2 \geq n_1$ tel que la même quantité est majorée par $1/4$, etc ... On construit ainsi une sous-suite qui vérifie l'inégalité ci-dessus. Pour simplifier l'écriture, nous écrivons (f_k) cette sous-suite, qui vérifie donc $\|f_{k+1} - f_k\|_{L^p} \leq 1/2^k$.

On introduit maintenant la fonction g_n définie par

$$g_n(x) = \sum_{k=1}^n |f_{k+1}(x) - f_k(x)|.$$

On a par construction $\|g_n\|_{L^p} \leq 1$. La suite $g_n(x)$ est croissante pour tout x , donc converge vers une limite

$$g(x) = \sum_{k=1}^{+\infty} |f_{k+1}(x) - f_k(x)| \in [0, +\infty].$$

La suite $g_n(x)^p$ est elle même croissante, et converge simplement vers $g(x)^p$. L'intégrale de g^p est donc finie d'après le théorème de convergence monotone III.7.23, page 100. La fonction g est donc dans $L^p(X)$, et $g(x)$ est fini pour presque tout x (voir proposition III.7.22). On a par ailleurs, pour tous $m \geq n \geq 2$,

$$\begin{aligned} |f_m(x) - f_n(x)| &\leq |f_m(x) - f_{m-1}(x)| + \cdots + |f_{n+1}(x) - f_n(x)| \\ &\leq \sum_{k=n}^{+\infty} |f_{k+1}(x) - f_k(x)| = g(x) - g_n(x). \end{aligned}$$

Cette dernière quantité étant finie presque partout, et du fait que $g_n(x)$ converge vers $g(x)$, la suite $f_n(x)$ est de Cauchy pour presque tout x , donc converge vers une limite, que l'on note $f(x)$. On a, pour presque tout x et $n \geq 2$,

$$|f(x) - f_n(x)| \leq g(x) \implies |f(x)| \leq |f_n(x)| + g(x),$$

d'où $f \in L^p(X)$. Enfin, $|f_n(x) - f(x)|^p$ tend vers 0 presque partout, et $|f_n(x) - f(x)|^p \leq g(x)^p$, qui est intégrable. Le théorème de convergence dominée assure donc la convergence de f_n vers f en norme L^p . \square

Notation III.10.10. On note $L^p(X)^n$ l'espace des fonctions vectorielles, c'est-à-dire à valeurs dans \mathbb{R}^n , donc chaque composante est dans $L^p(X)$. Cet espace est complet pour la norme¹⁸

$$\|f\|_{L^p(X)^n} = \left(\int_X \|f(x)\|_2^p d\mu(x) \right)^{1/p}.$$

III.10.3 Les espaces $L^p(\mathbb{N}) = \ell^p$ et $L^p(\mathbb{R}^d)$

Espaces de suites

On considère dans un premier temps le cas $X = \mathbb{N}$, muni de la tribu discrète (ensemble des parties) et de la mesure de comptage canonique :

$$A \subset \mathbb{N} \mapsto \mu(A) = \text{Card}(A).$$

Une “fonction” sur $X = \mathbb{N}$, c'est-à-dire une application de \mathbb{N} dans \mathbb{R} , peut s'écrire comme une suite (u_n) de $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$. Noter que, si les fonctions telles qu'on les a définies sont a priori autorisées à prendre la valeur $+\infty$, imposer l'appartenance à l'un des espaces L^p impose que toutes les valeurs soient finies. L'espace $L^p(\mathbb{N})$, pour $p \in [1, +\infty[$, s'identifie dans ce cas à l'espace des suites noté en général ℓ^p , défini par

$$\ell^p = \left\{ (u_n) \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}, \sum |u_n|^p < +\infty \right\}.$$

Nous avons montré précédemment qu'il s'agit d'un espace vectoriel normé complet pour la norme p , définie par

$$u = (u_n) \mapsto \|u\|_{\ell^p} = \left(\sum |u_n|^p \right)^{1/p}.$$

L'espace ℓ^∞ des suites bornées est de la même manière un espace vectoriel normé pour

$$\|u\|_{\ell^\infty} = \sup_n |u_n|.$$

On notera qu'il s'agit ici d'un sup “traditionnel”, du fait que l'espace \mathbb{N} muni de la mesure de comptage ne contient aucun ensemble non vide qui soit négligeable.

Il peut être pertinent de construire de tels espaces de suites à partir d'une mesure non uniforme sur \mathbb{N} , pour représenter par exemple une collection de masses ponctuelles non identiques. On considère dans cet esprit une collection infinie de masses strictement positives $(m_i)_{i \in \mathbb{N}}$, et la mesure associée

$$A \subset \mathbb{N} \mapsto m(A) = \sum_{i \in A} m_i \in [0, +\infty].$$

Si l'on se donne une fonction vectorielle sur X , à valeur dans \mathbb{R}^3 , qui correspond aux vitesses des masses, notée $v = (v_i)_{i \in \mathbb{N}}$, sa norme en tant qu'élément de l'espace $L^2(X, m)$ est définie par

$$\|v\|_{L^2}^2 = \sum_{i \in A} m_i |v_i|^2,$$

qui est (au facteur 1/2 près), l'énergie cinétique du système de masses. Le fait que cette énergie soit bornée n'empêche pas qu'il y ait des vitesses arbitrairement grandes. Dans ce qui précède nous avons considéré des particules labellisées, mais non situées dans l'espace. On peut construire un cadre fonctionnel permettant de suivre leurs positions dans l'espace en considérant la mesure discrète

$$\mu = \sum_{i=1}^{+\infty} m_i \delta_{x_i},$$

18. On notera l'utilisation de la norme euclidienne dans \mathbb{R}^n (indice 2 dans $\|f\|_2$). Ce choix est le plus couramment effectué, mais on pourrait munir \mathbb{R}^n d'une autre norme.

où les x_i sont des points de l'espace \mathbb{R}^3 (position des masses). La mesure μ , définie sur la tribu discrète (ensemble des parties de \mathbb{R}^3) est définie par

$$A \subset \mathbb{R}^3 \mapsto \mu(A) = \sum_{i, x_i \in A} m_i.$$

Noter que si l'on cherche à modéliser de cette façon (dite eulérienne) un nuage de particules en mouvement, l'objet naturel est une mesure μ_t dépendant du temps, définie comme ci-dessus à partir des positions courantes des particules. L'espace naturel pour représenter la vitesse dépendra alors lui-même du temps (contrairement au cadre précédent, purement lagrangien), puisque la mesure de référence, définie comme mesure sur \mathbb{R}^3 , dépend du temps.

Espaces de fonctions sur \mathbb{R}^d

La construction de la mesure de Lebesgue n'était pas nécessaire pour construire les espaces de suites ci-dessus, elle l'est en revanche pour les espaces fonctionnels correspondant au cas $X = \mathbb{R}$, $X = \mathbb{R}^d$, ou $X = \Omega$, avec Ω ouvert de \mathbb{R}^d . Si l'on considère ainsi un ouvert Ω de \mathbb{R}^d muni canoniquement de la mesure de Lebesgue¹⁹, la construction précédente permet en particulier d'identifier, pour $p \in [1, +\infty[$, l'espace

$$L^p(\Omega) = \left\{ f \text{ mesurable sur } \Omega, \int_{\Omega} |f(x)|^p dx < +\infty \right\}$$

à un espace vectoriel normé complet pour la norme

$$\|f\|_{L^p} = \left(\int_{\Omega} |f(x)|^p dx \right)^{1/p}.$$

De la même manière l'espace L^∞ est un espace de Banach pour la norme

$$\|f\|_{L^\infty} = \sup_{x \in \Omega} |f(x)|,$$

étant entendu qu'il s'agit ici du supremum *essentiel*, tel que défini par (III.10.1).

Exercice III.10.1. Construire une isométrie entre ℓ^p et un sous-espace vectoriel de $L^p(\mathbb{R})$, pour $p \in [1, +\infty]$. (Correction page 188)

Proposition III.10.11. L'espace $C_c(\mathbb{R})$ des fonctions continues à support compact est dense dans $L^p(\mathbb{R})$, pour tout $p \in [1, +\infty[$.

Démonstration. Nous démontrons tout d'abord cette propriété dans le cas $p = 1$. Toute fonction de $L^1(\mathbb{R})$ peut s'écrire comme somme d'une fonction positive et d'une fonction négative. Il suffit donc de montrer que l'on peut approcher une fonction positive par une fonction de C_c . D'après la proposition III.7.6 et le théorème de convergence monotone III.7.23, toute fonction positive peut être approchée avec une précision arbitraire en norme L^1 par une fonction étagée. Toute fonction étagée s'écrit comme combinaison linéaire de fonctions de type $\mathbf{1}_A$, où A est un borélien. On se ramène donc à la question de savoir si l'on peut approcher toute fonction de type $\mathbf{1}_A$ par une suite de fonctions continues à support compact. On utilise maintenant la régularité de la mesure de Lebesgue (théorème III.5.3, page 85), qui est en fait une conséquence directe de sa définition à partir de la mesure extérieure de Lebesgue. Il existe un ouvert U contenant A tel que $\lambda(U \setminus A) = \|\mathbf{1}_U - \mathbf{1}_A\|_{L^1}$ est arbitrairement petit, ce qui nous ramène à l'approximation d'une fonction de type $\mathbf{1}_U$, avec U ouvert. La suite de fonctions $\mathbf{1}_{]-n, n[} \mathbf{1}_U$ converge en norme L^1 vers $\mathbf{1}_U$ d'après le théorème de convergence

19. On utilisera ici la notation dx (à la place de $d\lambda$) pour représenter le volume élémentaire d'intégration associé à la mesure de Lebesgue, conformément à l'usage.

monotone, on se ramène ainsi à l'approximation d'une fonction de type $\mathbf{1}_U$, avec U ouvert borné. On considère la fonction f_n définie par

$$f_n(x) = \min(nd(x, U^c), 1),$$

où $d(x, U^c)$ est la distance de x au complémentaire de U . Il s'agit d'une suite qui converge simplement vers $\mathbf{1}_U$, dominée par $\mathbf{1}_U$, on a donc, d'après le théorème de convergence dominée,

$$\|\mathbf{1}_U - f_n\|_{L^1} = \int (\mathbf{1}_U - f_n) = \int \mathbf{1}_U - \int f_n \longrightarrow 0.$$

Les fonctions f_n étant continues et à support compact, nous avons ainsi montré que l'on peut approcher toute fonction de L^1 par une suite de telles fonctions.

Pour la convergence en norme L^p , on utilise le fait que toute fonction de L^p est approchable par une suite de fonctions bornées et à support compact (voir exercice III.12.15). On peut donc supposer la fonction f de L^p bornée par un certain M et à support compact. Elle est donc dans L^1 , et peut être approchée par une suite (f_n) de fonctions continues à support compact en norme L^1 . On a

$$|f(x) - f_n(x)|^p \leq M^{p-1} |f(x) - f_n(x)|.$$

L'intégrale de la fonction ci-dessus converge vers 0, d'où la convergence en norme L^p de f_n vers f . \square

Exercice III.10.2. Quelle est l'adhérence de $C_c(\mathbb{R})$ dans $L^\infty(\mathbb{R})$? (Correction page 189)

III.11 Compléments

Théorème III.11.1. (Radon-Nikodym)

Soit μ et λ deux mesures sur l'espace mesurable (X, \mathcal{A}) . On suppose que μ est absolument continue par rapport à λ (voir définition III.3.10, page 76). Alors il existe une fonction positive g mesurable telle que

$$\mu(A) = \int_A g d\lambda.$$

On dira que g est la *densité* de μ relativement à λ .

Définition III.11.2. (Points de Lebesgue)

Soit f une fonction intégrable sur \mathbb{R}^d . On dit que x est un point de Lebesgue de f si

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{\lambda(B(x, r))} \int_{B(x, r)} |f(y) - f(x)| dy = 0.$$

Théorème III.11.3. (de différentiation de Lebesgue)

Soit f une fonction intégrable sur \mathbb{R}^d . Les points de Lebesgue forment un ensemble de mesure pleine, c'est à dire que l'ensemble des points qui ne sont pas des points de Lebesgue est négligeable.

III.12 Exercices

Exercice III.12.1. Soit f une fonction de \mathbb{R} dans \mathbb{R} , dérivable en tout point. Montrer que la dérivée de f est mesurable. (Correction page 189)

Exercice III.12.2. Soit f une fonction mesurable de (X, \mathcal{A}, μ) dans \mathbb{R} , avec μ mesure finie. Pour tout $n \in \mathbb{N}$, on introduit

$$A_n = \{x \in X, |f(x)| \geq n\}, \quad B_n = \{x \in X, |f(x)| \in [n, n+1[\}.$$

Montrer que les trois assertions suivantes sont équivalentes

(i) La fonction f est intégrable

(ii) La série $\sum n\mu(B_n)$ est convergente.

(iii) La série $\sum \mu(A_n)$ est convergente.

(On pourra montrer $(i) \iff (ii)$ et $(ii) \iff (iii)$.) (Correction page 189)

Exercice III.12.3. Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré, et (f_n) une suite de fonctions mesurables à valeurs dans \mathbb{R}_+ , telle que

$$\int_X f_n(x) d\mu \leq M \quad \forall n.$$

On définit $f = \liminf f_n$. Montrer que

$$\int_X f(x) d\mu \leq M.$$

(Correction page 190)

Exercice III.12.4. Soit f une fonction mesurable de (X, \mathcal{A}, μ) à valeurs dans \mathbb{R} , intégrable. Pour tout $n \in \mathbb{N}$, on introduit

$$A_n = \{x \in X, |f(x)| \geq n\}.$$

a) Montrer que

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_{A_n} |f(x)| d\mu = 0$$

b) Montrer que, pour tout $\varepsilon > 0$, il existe $\delta > 0$ tel que

$$\forall A \in \mathcal{A} \text{ tel que } \mu(A) \leq \delta, \text{ on a } \int_A |f(x)| d\mu < \varepsilon.$$

(On pourra utiliser la décomposition d'une partie A en $A \cap A_n$ et $A \cap A_n^c$.)

(Correction page 190)

Exercice III.12.5. Calculer les limites quand n tend vers $+\infty$ de

$$u_n = \int_0^1 \frac{1 + nx^3}{(1 + x^2)^n} dx, \quad v_n = \int_0^{+\infty} \frac{\sin(\pi x)}{1 + x^n} dx$$

(Correction page 190)

Exercice III.12.6. (Intégrale dépendant d'un paramètre)

Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré (par exemple $(\mathbb{R}, \mathcal{B}, \lambda)$), et f une application de $X \times I$ dans \mathbb{R} , où I est un intervalle de \mathbb{R} .

- a) On suppose dans un premier temps que f vérifie les propriétés suivantes :
- (i) Pour tout $t \in I$, la fonction $x \mapsto f(x, t)$ est mesurable.
 - (ii) Pour tout $x \in X$, la fonction $t \mapsto f(x, t)$ est continue.
 - (iii) Il existe une fonction g sur X , intégrable, telle que pour tout $(x, t) \in X \times I$,

$$|f(x, t)| \leq g(x).$$

Montrer que l'application

$$F : t \in I \mapsto \int_X f(x, t) d\mu(x)$$

est bien définie et continue sur I .

- b) On renforce les hypothèses sur f de la façon suivante :
- (iv) Pour tout $x \in X$, la fonction $t \mapsto f(x, t)$ est continûment différentiable.
 - (v) Il existe une fonction h sur X , intégrable, telle que pour tout $(x, t) \in X \times I$,

$$\left| \frac{\partial f}{\partial t}(x, t) \right| \leq h(x).$$

Montrer que l'application F définie ci-dessus est bien définie et dérivable sur \mathbb{R} , de dérivée

$$F'(t) = \int_X \frac{\partial f}{\partial t}(x, t) d\mu(x).$$

(Correction page 190)

Exercice III.12.7. Soient (X_1, \mathcal{A}_1) et (X_2, \mathcal{A}_2) deux espaces mesurables, et γ une mesure sur $\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$. On note π_1 la projection sur X_1 , définie par $\pi_1(x_1, x_2) = x_1$. On appelle première marginale de γ la mesure transportée $\mu_1 = (\pi_1)_\# \gamma$ (voir exercice III.6.8). On définit de même la deuxième marginale μ_2 sur \mathcal{A}_2 .

- a) Pour $A_i \in \mathcal{A}_i$, donner l'expression de $\mu_i(A_i)$, et montrer que μ_1 et μ_2 ont même masse totale. A-t-on en général $\gamma = \mu_1 \otimes \mu_2$?

Si γ est la loi d'une variable aléatoire $(Y_1, Y_2) \in X_1 \times X_2$, interpréter μ_1 et μ_2 .

- b) Dans le cas où $X_1 = X_2 = \llbracket 1, N \rrbracket$, munis de leurs tribus discrètes, montrer que toute mesure γ sur $\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$ peut se représenter par une matrice carrée $A \in \mathcal{M}_N(\mathbb{R})$, et préciser comment construire μ_1 et μ_2 à partir de A .

Introduction au transport optimal

- c) Pour μ_1 et μ_2 mesures de même masse finie $M > 0$ sur \mathcal{A}_1 et \mathcal{A}_2 , respectivement, on définit

$$\Pi_{\mu_1, \mu_2} = \{ \gamma \in \mathcal{M}_M(X_1 \times X_2), (\pi_i)_\# \gamma = \mu_i, i = 1, 2 \},$$

où $\mathcal{M}_M(X_1 \times X_2)$ est l'espace des mesures sur $X_1 \times X_2$ de masse M . Montrer que Π_{μ_1, μ_2} est non vide.

- d) On se place dans le cas $X_1 = X_2 = \mathbb{R}^d$, muni de la tribu borélienne, et l'on considère μ_1 et μ_2 des mesures sur \mathbb{R}^d définies par

$$\mu_1 = \sum_{i=1}^n \alpha_i \delta_{x_i}, \mu_2 = \sum_{j=1}^m \beta_j \delta_{y_j}, \sum \alpha_i = \sum \beta_j = M, \alpha_i \geq 0, \beta_j \geq 0.$$

Décrire l'ensemble Π_{μ_1, μ_2} . Dans quel cas cet ensemble est-il réduit à un singleton ?

e) On se place dans le cadre de la question précédente, et l'on se donne une collection $(c_{ij}) \in \mathbb{R}_+^{n \times m}$ de *coûts*. Pour tout couple (i, j) , le nombre c_{ij} correspond à ce que coûte le transport d'une quantité unitaire de matière de x_i vers y_j . On pourra prendre $c_{ij} = \|y_j - x_i\|$ pour fixer les idées.

Montrer que le problème

$$\min_{\gamma \in \Pi_{\mu_1, \mu_2}} \sum_{i,j} \gamma_{ij} c_{ij}$$

admet une solution. Cette solution est-elle unique en général ?

f) (★) Imaginer une situation de la vie réelle (dans un contexte de logistique de transport), où les x_i correspondraient à des lieux de production, et les y_j des lieux de vente ou de consommation. Discuter du choix des (c_{ij}) en terme de pertinence.

g) (★) On considère une population de n employés sur une période donnée, et l'on note μ_i le temps de travail de l'employé i durant cette période. On considère qu'il y a m tâches à accomplir, associée chacune, pour fixer les idées, à une machine j , et l'on suppose que le temps de disponibilité de la machine durant la période considérée est égal à ν_j . On note u_{ij} la *productivité* de l'employé i vis-à-vis de la tâche j , de telle sorte que $u_{ij}\mu_i$ est la valeur ajoutée résultant du travail de i à la tâche j pendant le temps μ_i . On suppose que le temps de travail total est égal au temps total de disponibilité des machines (on ne se préoccupera pas des questions de répartition effective des tâches durant la période de temps considérée, en supposant par exemple que cette période est très grande). Montrer que chercher à maximiser la valeur ajoutée totale conduit à un problème d'*affectation* du type de celui étudié dans les questions précédentes. (Correction page 191)

Exercice III.12.8. Soit f une fonction d'un espace mesuré (X, \mathcal{A}, μ) dans \mathbb{R}_+ , mesurable.

a) On munit $X \times \mathbb{R}_+$ de la tribu produit. Montrer que la fonction F à valeurs dans \mathbb{R} qui à (x, t) associe $f(x) - t$ est mesurable.

b) Montrer que la fonction $\mathbb{1}_{\{(x,t), f(x) \geq t\}}$ est mesurable sur $X \times \mathbb{R}_+$.

c) Montrer que

$$\int_X f(x) d\mu = \int_0^{+\infty} \mu(\{x, f(x) \geq t\}) dt.$$

d) Interpréter graphiquement l'identité de la fonction précédente dans le cas où X est un intervalle réel et f une fonction régulière. Expliquer en quoi cette formule suggère une méthode numérique d'estimation effective de l'intégrale d'une fonction régulière de \mathbb{R} dans \mathbb{R}_+ , que l'on pourrait appeler méthode des "rectangles horizontaux".

(Correction page 192)

Exercice III.12.9. Soit f une fonction intégrable de (X, \mathcal{A}, μ) dans \mathbb{R} . Montrer que presque tous les ensembles de niveaux sont de mesure nulle, c'est-à-dire que, pour presque tout t réel, on a

$$\mu(\{x, f(x) = t\}) = 0.$$

(On pourra s'inspirer de la démarche proposée à l'exercice III.12.8).

Exercice III.12.10. On considère la fonction

$$(x, y) \in]0, +\infty[\times]0, 1[\longmapsto 2e^{-2xy} - e^{-xy}.$$

Montrer que les deux quantités

$$\int_0^1 \left(\int_0^{+\infty} f(x, y) dx \right) dy \quad \text{et} \quad \int_0^{+\infty} \left(\int_0^1 f(x, y) dy \right) dx$$

sont bien définies, mais ont des valeurs différentes.

Que peut-on en déduire sur la fonction f ?

Exercice III.12.11. On considère la fonction définie sur $[-1, 1] \times [-1, 1] \setminus \{(0, 0)\}$ par

$$f(x, y) = \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2}.$$

a) Montrer que

$$\int_{-1}^1 \left(\int_{-1}^1 f(x, y) dx \right) dy \neq \int_{-1}^1 \left(\int_{-1}^1 f(x, y) dy \right) dx$$

b) Expliquer en quoi cette propriété n'est pas en contradiction avec le théorème de Fubini-Lebesgue. (On pourra montrer que f n'est pas intégrable au voisinage de 0 en calculant l'intégrale de $|f|$ sur la couronne $\{(x, y), \varepsilon < \sqrt{x^2 + y^2} < 1\}$.) (Correction page 194)

Exercice III.12.12. (Densité gaussienne)

a) Calculer

$$\int_{\mathbb{R}^2} e^{-(x^2+y^2)} d\lambda(x, y) = \int_{\mathbb{R}^2} e^{-(x^2+y^2)} dx dy.$$

(On pourra utiliser les coordonnées polaires sur \mathbb{R}^2 .)

b) Montrer que l'intégrale ci-dessus peut s'exprimer simplement en fonction de $\int_{\mathbb{R}} e^{-x^2} dx$.

c) Pour $\sigma > 0$ fixé, on considère l'application

$$x = (x_1, \dots, x_d) \mapsto f(x) = e^{-\frac{x_1^2 + \dots + x_d^2}{2\sigma^2}}.$$

Calculer le coefficient C assurant que la mesure associée à la fonction Cf , vue comme une densité, soit de masse totale égale à 1. (Correction page 194)

Exercice III.12.13. Montrer que la boule unité fermée de $L^\infty(\mathbb{R})$ n'est pas compacte. Cette non compacité résulte-t-elle de la non compacité de \mathbb{R} ? (Correction page 195)

Exercice III.12.14. On se place sur l'intervalle borné $I =]a, b[$ muni de la mesure de Lebesgue.

a) Montrer que $L^p(I) \subset L^1(I)$ pour tout $p \in]1, +\infty[$.

b) Le sous-espace L^p est-il fermé dans L^1 ?

c) Montrer que les inclusions du (a) sont invalidées si l'intervalle n'est pas borné (on pourra considérer le cas $I =]1, +\infty[$) (Correction page 195)

Exercice III.12.15. (Opérateur de troncature)

Soit $f \in L^p(\mathbb{R})$, avec $p \in [1, +\infty[$.

a) On définit

$$t \in \mathbb{R} \mapsto T_n(t) = \begin{cases} t & \text{si } |t| \leq n \\ n \frac{t}{|t|} & \text{si } |t| > n \end{cases}$$

Montrer que $T_n \circ f$ tend vers f dans $L^p(\mathbb{R})$.

b) On note χ_n la fonction indicatrice de $] -n, n[$. Montrer que $\chi_n f$ tend vers f dans $L^p(\mathbb{R})$.

- c) Montrer que $\chi_n T_n \circ f$ tend vers f dans L^p .
- d) Que peut-on dire de $T_n \circ f$, $\chi_n f$, et $\chi_n T_n \circ f$, dans le cas $p = +\infty$? (Correction page 195)

Chapitre IV

Fondamentaux et compléments

Sommaire

IV.1 Fondamentaux	121
IV.1.1 Éléments de théorie des ensembles	121
IV.1.2 Structures fondamentales	123
IV.1.3 Cardinalité	124
IV.1.4 L'ensemble des réels : construction et structures afférentes	126
IV.1.5 Inégalités fondamentales	131
IV.2 Pour aller plus loin (●●●●)	133
IV.2.1 Théorie des ensembles, cardinalité	133
IV.2.2 Complété d'un espace métrique (●●●●)	133
IV.2.3 Topologie générale (●●●●)	134

IV.1 Fondamentaux

IV.1.1 Éléments de théorie des ensembles

Notations IV.1.1. (○) Soit X un ensemble, on note $\mathcal{P}(X)$ l'ensemble des parties de X , c'est à dire l'ensemble des sous-ensembles constitués d'éléments de X .

Soit A une partie de X . On note A^c le complémentaire de A dans X , c'est-à-dire l'ensemble des éléments de X qui ne sont pas dans A .

Soient A et B deux parties d'un ensemble X . On dit que A est inclus dans B , et l'on écrit $A \subset B$, si tout élément de A est aussi élément de B :

$$x \in A \implies x \in B.$$

On a¹ $\emptyset \subset B$ pour toute partie B .

1. Cette assertion est à la fois évidente et troublante, du fait que l'ensemble vide est inclus dans toute partie de n'importe quel ensemble. Ce fait rend possible d'énoncer des propriétés comme : tout élément de l'ensemble vide est un *porte-clé*, ce qui signifie précisément que l'assertion : “ $\forall x \in A, x$ est un porte-clé” est vraie pour $A = \emptyset$. De façon générale, toute propriété portant sur les éléments d'un ensemble est systématiquement vérifiée par l'ensemble vide.

Soient A et B deux parties d'un ensemble X . On note $A \cap B$ l'*intersection* de A et B , c'est à dire l'ensemble des éléments qui appartiennent à la fois à A et à B :

$$A \cap B = \{x \in X, x \in A \text{ et } x \in B\} .$$

On note $A \cup B$ l'*union* de A et B , c'est à dire l'ensemble des éléments qui sont dans A ou dans B :

$$A \cup B = \{x \in X, x \in A \text{ ou } x \in B\} .$$

Si $(A_i)_{i \in I}$ est une famille de parties disjointes de X , non vides, dont l'union est égale à X , on dit qu'elle réalise une *partition* de X .

On note $A \setminus B$ la *différence ensembliste* de A et B , c'est à dire l'ensemble des éléments qui sont dans A , mais pas dans B :

$$A \setminus B = \{x \in X, x \in A, x \notin B\} = A \cap B^c.$$

Soient X et Y deux ensembles. On appelle *produit cartésien* de X et Y , et l'on note $X \times Y$, l'ensemble des couples (x, y) avec $x \in X$ et $y \in Y$.

Soient X et Y deux ensembles, on note Y^X l'ensemble des applications de X vers Y . On peut représenter chaque application par une partie de $X \times Y$ qui, pour tout x , contient un unique couple du type (x, y) (l'élément y est l'image de x par l'application considérée). L'ensemble des couples $(x, f(y))$ est appelé *graphe* de l'application f .

On peut identifier une partie A d'un ensemble X à sa *fonction indicatrice*² $\mathbb{1}_A$, qui à chaque élément x de X associe la valeur 1 ou 0, selon que x soit dans A ou pas. Chaque partie pouvant ainsi être identifiée à une application de X dans $\{0, 1\}$, on note parfois 2^X l'ensemble des parties de X .

Définition IV.1.2. (Autour de la notion d'application (\circ))

Soient X et Y deux ensembles, et f une application de X dans Y . Pour tout $y \in Y$, on appelle image réciproque de y , et l'on note³ $f^{-1}(\{y\})$ (ou $f^{-1}(y)$) l'ensemble des antécédents de y :

$$f^{-1}(y) = \{x, y = f(x)\} .$$

On définit de la même manière l'image réciproque d'un ensemble $B \subset Y$ par

$$f^{-1}(B) = \{x, f(x) \in B\} .$$

On dit que f est *injective* si deux éléments de x ne peuvent avoir la même image, c'est-à-dire si l'image réciproque de tout $y \in Y$ contient au plus un élément.

On dit que f est *surjective* si tout élément de l'espace d'arrivée Y a eu moins un antécédent, c'est-à-dire si l'image réciproque de tout $y \in Y$ contient au moins un élément.

On dit que f est *bijjective* si elle est injective et surjective, c'est-à-dire si l'image réciproque de tout élément de l'ensemble d'arrivée contient exactement un élément.

Remarque IV.1.3. Toutes les opérations ensemblistes peuvent être traduites en terme de fonctions indicatrices. Par exemple si, pour $C \subset X$, on définit $\mathbb{1}_C$ comme la fonction qui vaut 1 sur C , 0 à l'extérieur de C , on a

$$\mathbb{1}_{A \cup B} = \max(\mathbb{1}_A, \mathbb{1}_B), \quad \mathbb{1}_{A \cap B} = \min(\mathbb{1}_A, \mathbb{1}_B) = \mathbb{1}_A \times \mathbb{1}_B, \quad \mathbb{1}_{A^c} = 1 - \mathbb{1}_A.$$

2. Le terme de fonction *caractéristique* est parfois utilisé, mais nous l'évitons ici car il prend un autre sens dans le contexte des probabilités. On prendra néanmoins garde au fait que le terme de fonction indicatrice prend lui aussi un autre sens en *analyse convexe*, et donc en optimisation, désignant une fonction associée à un ensemble qui prend la valeur 0 dans l'ensemble, et $+\infty$ à l'extérieur.

3. On prendra garde à la confusion possible avec l'application inverse d'une bijection, notée également f^{-1} . Pour distinguer l'application considérée ici de cet inverse défini (quand c'est possible) de Y dans X , on utilise en général la notation ensembliste $f^{-1}(\{y\})$, qui rappelle que l'on considère ici une application qui à un ensemble (une partie de Y) associe un ensemble (une partie de X), qui peut être vide, ou non réduite à un singleton.

IV.1.2 Structures fondamentales

Définition IV.1.4. (Relation d'équivalence, classes d'équivalence (\circ))

Soit X un ensemble. Une relation d'équivalence est la donnée d'une partie R de $X \times X$, dénotée par le symbole \mathcal{R} selon la convention

$$(x, x') \in R \iff x \mathcal{R} x',$$

qui vérifie les propriétés suivantes :

- (i) (*réflexivité*) Pour tout $x \in X$, $x \mathcal{R} x$.
- (ii) (*symétrie*) Pour tous $x, y \in X$, $x \mathcal{R} y \iff y \mathcal{R} x$.
- (iii) (*transitivité*) Pour tous $x, y, z \in X$,

$$x \mathcal{R} y \text{ et } y \mathcal{R} z \implies x \mathcal{R} z.$$

Pour tout $x \in X$, on appelle classe d'équivalence l'ensemble

$$\bar{x} = \{y \in X, y \mathcal{R} x\} \in \mathcal{P}(X).$$

L'ensemble \bar{X} constitué de ces classes est appelé espace quotient, ce que l'on note $\bar{X} = X / \mathcal{R}$.

L'application qui à $x \in X$ associe sa classe \bar{x} est par construction une surjection, appelée *surjection canonique*.

Remarque IV.1.5. La notion de classes d'équivalence semble se limiter à formaliser différemment la notion de *partition* d'un ensemble. De fait, à toute partition d'un ensemble, i.e. $X = \bigcup X_i$ (union disjointe), on peut associer canoniquement la relation d'équivalence $x \mathcal{R} y$ si x et y appartiennent au même X_i . Cette notion est beaucoup plus féconde que cette version ensembliste dès que X est muni d'une structure, et que la relation d'équivalence respecte cette structure (dans un sens qui dépend de la structure en question). L'espace \bar{X} des classes d'équivalence hérite alors de la structure de l'espace initial, c'est un espace de même type (groupe, espace vectoriel, espace métrique, ...), qui est "plus petit" puisqu'il existe une surjection de X vers \bar{X} (la surjection canonique). L'exemple le plus simple est \mathbb{Z} quotienté par la relation : $x \mathcal{R} y$ si et seulement si $x - y$ est pair. On a deux classes d'équivalences, notés $\bar{0}$ et $\bar{1}$. On peut définir sur l'espace quotient une addition $\bar{x} + \bar{y} = \overline{x + y}$ (on peut vérifier que ça ne dépend pas du représentant choisi : la somme de deux entiers de même parité est paire, impaire si les parités sont différentes), de telle sorte que l'espace quotient, noté $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$, est aussi un groupe additif. Dans un contexte de fonctions mesurables (voir le chapitre dédié à ces questions), il sera extrêmement fécond d'introduire la relation d'équivalence $f \mathcal{R} g$ si l'ensemble des points en lesquels f et g diffèrent est négligeable. L'espace quotient contient des classes de fonctions, et il hérite des structures de l'espace initial (en particulier la structure d'espace vectoriel).

Définition IV.1.6. (Relation d'ordre, majorant (\circ))

Soit X un ensemble. Une relation d'ordre sur X est la donnée d'une partie \mathcal{O} de $X \times X$, dénotée par le symbole \leq selon la convention

$$(x, x') \in \mathcal{O} \iff x \leq x',$$

qui vérifie les propriétés suivantes :

- (i) (*réflexivité*) pour tout $x \in X$, $x \leq x$,
- (ii) (*antisymétrie*) si $x \leq y$ et $y \leq x$ alors $x = y$,
- (iii) (*transitivité*) pour tous $x, y, z \in X$,

$$x \leq y \text{ et } y \leq z \implies x \leq z.$$

On écrit $x < y$ si $x \leq y$ et $x \neq y$. On dit que l'ordre est *total* si, pour tout $x \neq y$, on a $x < y$ ou $y < x$. On dit qu'il est *partiel* dans le cas contraire. Lorsque l'ordre est partiel, deux éléments peuvent ne pas être comparables.

On dit que M est un *majorant* de $A \subset M$ si $x \leq M$ pour tout $x \in A$. Si $A \subset M$ admet un plus petit majorant, on l'appelle *borne supérieure* de A . On définit de la même manière un *minorant* d'un ensemble, et une *borne inférieure*.

Exercice IV.1.1. a) Montrer que la relation d'inclusion sur l'ensemble des parties d'un ensemble X est une relation d'ordre. À partir de quel cardinal de X l'ordre n'est-il que partiel ?

b) Proposer une relation d'ordre sur l'ensemble des partitions d'un ensemble.

c) Décrire les éléments maximaux et minimaux des relations d'ordre évoquées ci-dessus.

Remarque IV.1.7. Les relations d'équivalence et d'ordre peuvent être encodées par des *graphes*. Pour la relation d'équivalence, on peut considérer l'ensemble $E \subset X \times X$ des points en relation comme décrivant les arêtes d'un graphe. Cet ensemble est symétrique, de telle sorte que l'on peut identifier $(x, y) \in E$ et $(y, x) \in E$, E contient toutes les boucles (x, x) (réflexivité), et les composantes connexes du graphes sont des *cliques* (i.e. le sous-graphe correspondant est complet : il contient toutes les arêtes possibles entre les sommets).

Pour une relation d'ordre, l'ensemble $E \subset X \times X$ d'arêtes n'est pas symétrique (ou plutôt il ne l'est que dans le cas d'un graphe éclaté qui ne contient que des boucles, qui représente une relation d'ordre partiel d'un type extrême, où deux éléments distincts ne sont jamais comparables), on parle de graphe *orienté*. Il contient aussi toutes les boucles (réflexivité), vérifie la propriété de transitivité $(x, y) \in E$ et $(y, z) \in E$ implique $(x, z) \in E$, et ne contient *aucun cycle*, i.e. il n'est pas possible, partant d'un point, de se déplacer en suivant les flèches pour se retrouver au point de départ. On dit que le graphe est *acyclique*.

IV.1.3 Cardinalité

Définition IV.1.8. (Équipotence)

On dit que deux ensembles X et Y sont *équipotents* s'il existe une bijection de X dans Y . On écrira alors $X \simeq Y$ ou ⁴ $\text{Card}(X) = \text{Card}(Y)$.

Notation IV.1.9. S'il existe une injection de X dans Y , on écrit $X \lesssim Y$, ou $\text{Card}(X) \leq \text{Card}(Y)$. Si de plus il n'existe pas de bijection entre les deux ensembles, on écrira $X < Y$ ou $\text{Card}(X) < \text{Card}(Y)$.

Théorème IV.1.10. On note $\mathcal{P}(X)$ l'ensemble des parties de X . On a

$$\text{Card}(X) < \text{Card}(\mathcal{P}(X)).$$

Démonstration. Supposons qu'il existe une surjection φ de X dans $\mathcal{P}(X)$. On introduit

$$A = \{x \in X, x \notin \varphi(x)\}.$$

Comme φ est surjective, il doit exister x tel que $\varphi(x) = A$. Si $x \in A$, alors $x \in \varphi(x)$ d'où $x \notin A$. Si $x \notin A = \varphi(x)$, alors $x \in A$. On a donc contradiction dans les deux cas, ce qui exclut l'existence d'une telle application φ . \square

Définition IV.1.11. (Ensemble dénombrable)

On dit que l'ensemble X est dénombrable si X est fini⁵, ou si $X \simeq \mathbb{N}$, i.e. s'il est en bijection avec \mathbb{N} . Un ensemble infini dénombrable est donc énumérable : si l'on note φ la bijection de \mathbb{N} vers X , et

4. On prendra garde à cette notation $\text{Card}(X) = \text{Card}(Y)$ qui exprime simplement l'existence d'une bijection entre deux ensembles. Dans le cas d'ensembles finis, cela correspond bien à l'identité des cardinaux, mais pour des ensembles infinis, il faut lire comme un tout cette identité, qui implique des "quantités" ($\text{Card}(X)$ et $\text{Card}(Y)$) qui n'ont pas été définies.

	9					
x2	5	8				
x1	2	4	7			
x0	0	1	3	6		

FIGURE IV.1.1 – Énumération d’une réunion dénombrable d’ensembles dénombrables

$x_n = \varphi(n)$, l’ensemble X est exactement la collection des x_n , et l’on note $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$, ou simplement (x_n) , la suite associée.

Proposition IV.1.12. Une union dénombrable d’ensembles infinis dénombrables est dénombrable.

Démonstration. Nous établissons la propriété dans le cas où l’union et les ensembles sont infinis. Soit $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une famille d’ensembles infinis dénombrables. On peut énumérer les éléments de chaque X_n : $X_n = \{x_n^k, k \in \mathbb{N}\}$. On peut énumérer les éléments de la réunion de la façon suivante :

$$x_0^0, x_0^1, x_1^0, x_0^2, x_1^1, x_2^0, x_0^3, \dots$$

comme illustré par la figure IV.1.1. Dans le cas où certains des ensembles sont finis, ou si la réunion est finie, ou si les ensembles partagent certains de leurs éléments, la construction précédente permet d’établir une bijection entre la réunion et une partie de \mathbb{N} , cette réunion est donc finie ou infinie dénombrable. \square

Proposition IV.1.13. Un produit fini d’ensembles dénombrables est dénombrable.

Démonstration. On considère N ensembles dénombrables X_1, \dots, X_N , pour lesquels on se donne une énumération, et l’on note $P_k \subset X_1 \times \dots \times X_N$ les éléments du produits qui ne font intervenir que les k premiers termes de chacun des X_i dans l’énumération choisie. Son cardinal est le nombre de mots de N lettres que l’on peut constituer à partir d’un alphabet de cardinal k , qui est k^N , il est donc fini. Le produit des X_i est inclus dans la réunion des P_k , il est donc dénombrable comme union dénombrables d’ensembles finis (proposition IV.1.12). \square

Exercice IV.1.2. (••) On considère l’ensemble $X = \{0, 1\}^{\mathbb{N}}$ des suites infinies de 0 ou 1.

- 1) Montrer que X n’est pas dénombrable.
- 2) Montrer que le sous-ensemble X_0 des suites constantes au delà d’un certain rang est dénombrable.
- 3) Montrer que l’ensemble X_{per} des suites périodiques au delà d’un certain rang est dénombrable.
- 4) On définit l’application φ_N qui à tout $x \in X$ associe la valeur moyenne des N premiers termes. Montrer que, pour tout $x \in X_{per}$ (et donc a fortiori tout $x \in X_0$), la quantité $\varphi_N(x)$ admet une limite quand N tend vers $+\infty$. Montrer que cette propriété n’est pas vraie pour tous les éléments de X .
- 5) L’ensemble des éléments de X pour lesquels $\varphi_N(x)$ converge lorsque N tend vers $+\infty$ est-il dénombrable ?

5. Certains auteurs considèrent que l’attribut dénombrable est restreint aux ensemble infinis. Nous faisons ici le choix de considérer qu’un ensemble fini est dénombrable, ce qui permet de simplifier l’énoncé d’un grand nombre de propriétés. Ce choix impose de préciser *infini dénombrable* pour un ensemble qui est en bijection avec \mathbb{N} .

IV.1.4 L'ensemble des réels : construction et structures afférentes

Il existe de multiples manières de construire l'ensemble \mathbb{R} des réels munis de ses structures principales. La plupart des ouvrages privilégient une approche axiomatique et abstraite, nous décrivons ici une démarche plus ancrée sur la pratique quotidienne des nombres réels et leur utilisation effective, en nous en tenant ici à ce qui est strictement utile pour les sections qui précèdent.

La construction proposée peut sembler périlleuse : on utilisera ci-dessous des propriétés métriques de cet ensemble, en particulier la complétude, pour définir certaines opérations comme la multiplication. Or la notion même de distance, qui est une application à image dans \mathbb{R} , nécessite que la droite des réels soit bien définie. On pourra cependant vérifier que la notion de métrique et de convergence d'une suite ne nécessite qu'une structure d'ordre sur \mathbb{R} (qui est définie dès la proposition IV.1.18), la notion de valeur absolue (définie d'emblée), et l'addition entre deux réels (définition IV.1.21), qui ne nécessite pas de structure métrique.

Au-delà de ces questions de cohérence de la construction, les paragraphes qui suivent contiennent des développements assez fastidieux visant à définir des opérations du type de celles pratiquées par les écoliers dès leur plus jeune âge, en particulier l'addition (ou la soustraction) entre nombres. Nous avons ici une petite difficulté supplémentaire liée au fait que ces opérations posées commencent *par la droite*, c'est à dire du côté où un nombre réel non décimal est infini, ce qui nécessite une adaptation de la procédure.

Nous supposons construit l'ensemble \mathbb{Z} muni des deux lois $' + '$ et $' \times '$ qui en font un anneau, muni de la relation d'ordre total usuel. Et nous définissons l'ensemble \mathbb{R} à l'aide de la représentation décimale décrite ci-dessous.

Définition IV.1.14. (Ensemble des réels)

On définit l'ensemble \mathbb{R} comme $\{+, -\} \times \mathbb{N} \times \llbracket 0, 9 \rrbracket^{\mathbb{N}^*}$, c'est-à-dire de l'ensemble des

$$\pm a_0, a_1 a_2 \dots a_k \dots$$

avec $a_0 \in \mathbb{N}$, et les a_k (appelées *décimales*) sont des entiers entre 0 et 9. On appelle *nombre réel* l'un de ces objets. On appelle *nombre décimal* un nombre dont l'écriture décimale est finie, c'est à dire que a_n est identiquement nul au-delà d'un certain rang, et l'on note \mathbb{D} l'ensemble de ces nombres. On exclut *a priori* les nombres dont l'écriture finit par une infinité de 9 consécutifs, mais on prendra la liberté d'autoriser ponctuellement cette pathologie d'écriture⁶, qui concerne les nombres décimaux. Tout nombre décimal peut en effet s'écrire

$$\pm a_0, a_1 \dots a_r 000 \dots \text{ avec } a_r \geq 1, \text{ ou } \pm a_0, a_1 \dots (a_r - 1) 999 \dots,$$

On appellera *propre* l'écriture d'un décimal sans l'infinité de 9.

Pour tout $a \in \mathbb{R}$, on note $-a$ le nombre obtenu en changeant le signe de a , qu'on appelle l'*opposé* de a , et $|a|$ (valeur absolue de a) le nombre obtenu en remplaçant le signe par $' + '$. On dira qu'un réel est strictement positif si son signe est $' + '$ et que ses décimales ne sont pas toutes nulles, et strictement négatif si son opposé est strictement positif. 'Positif' signifie strictement positif ou nul, de même pour 'négatif'. Le nombre $0 = +0.0000 \dots$ peut s'écrire aussi $0 = -0.0000 \dots$, c'est le seul nombre à la fois positif et négatif.

Définition IV.1.15. (Troncature entière, partie entière)

On appelle *troncature entière* de $a = \pm a_0, a_1 \dots$ l'entier relatif $\pm a_0 \in \mathbb{Z}$, et *partie entière* de a l'entier $+a_0$ si a est positif, et $-a_0 - 1$ si a est strictement négatif. La partie entière de -1.3 est ainsi -2 , et sa troncature entière est -1 .

6. Il est prudent de garder cette possibilité, du fait que ces objets sont susceptibles d'apparaître spontanément, comme lorsque l'on définit des sommes du type $0.111 \dots + 0.888 \dots$.

Remarque IV.1.16. La représentation décimale traditionnelle des réels décrite ci-dessus privilégie la notion de troncature, \mathbb{R} est ainsi représenté en miroir, symétriquement par rapport à l'origine 0, qui se voit jouer de fait un rôle singulier. Nous verrons que ce choix est très adapté à la multiplication, mais moins à l'addition (définir l'addition entre nombres de signes différents demande un peu de soin). Signalons que l'on pourrait imaginer une autre convention, plus respectueuse de l'addition, invariante par translation, en représentant un nombre par un entier relatif (la partie entière), plus un nombre du type $0, a_0 a_1 \dots$, de telle sorte que par exemple $-1, 23$ s'écrirait $(-2) + 0.77$. Selon cette écriture, il serait non trivial de construire l'opposé d'un nombre (alors que c'est immédiat avec la représentation-miroir que nous privilégions). Nous utiliserons ponctuellement cette vision des choses lors de la construction de l'addition entre deux nombres de signes distincts.

Théorème IV.1.17. L'ensemble \mathbb{D} des nombres décimaux est infini dénombrable, l'ensemble \mathbb{R} des nombres réels est infini non dénombrable.

Démonstration. L'ensemble \mathbb{D} contenant \mathbb{N} , il est au moins infini dénombrable. Il s'écrit par ailleurs comme union des \mathbb{D}_n , qui sont les nombres décimaux dont les décimales sont nulles au-delà du rang n . Chacun de ces ensembles étant dénombrable (en multipliant par 10^n on retrouve les entiers), \mathbb{D} est dénombrable comme réunion d'ensembles dénombrables (proposition IV.1.12).

Montrons maintenant, en suivant une démarche proche de la démonstration du théorème IV.1.10, que l'intervalle $[0, 1[$ n'est pas dénombrable. Supposons qu'il le soit, on peut alors énumérer ses éléments

$$\begin{aligned} r_1 &= 0, \mathbf{a_1^1} \mathbf{a_1^2} \mathbf{a_1^3} \dots \\ r_2 &= 0, a_2^1 \mathbf{a_2^2} \mathbf{a_2^3} \dots \\ r_3 &= 0, a_3^1 a_3^2 \mathbf{a_3^3} \dots \\ &\vdots = 0, \vdots \end{aligned}$$

On construit alors un nombre par le procédé d'*extraction diagonale de Cantor* (décimales indiquées en gras ci-dessus), chaque décimale de ce nombre étant définie selon le principe suivant : si la n -ième décimale de r_n est différente de 1, on la fixe à 1, si elle est égale à 1, on la fixe à 2 (par exemple). On construit ainsi un nombre réel en écriture propre qui par construction ne peut pas figurer dans la liste ci-dessus, qui est pourtant une énumération exhaustive de $[0, 1[$. On en déduit par contradiction que $[0, 1[$ n'est pas dénombrable. \square

Proposition IV.1.18. (Relation d'ordre total)

L'ensemble \mathbb{R} admet une relation d'ordre total \leq .

Démonstration. Soient $a = a_0, a_1 \dots$ et $b = b_0, b_1 \dots$ deux éléments de \mathbb{R} positifs et proprement écrits. S'ils sont différents, il existe un plus petit $k \in \mathbb{N}$ tel que $a_k \neq b_k$. Si $a_k < b_k$, on dit que $a < b$, et $b < a$ dans le cas contraire. On dit que tout négatif est inférieur à tout positif, et que, pour deux nombres a et b négatifs, on a $a < b$ si et seulement si $-b < -a$. Cette relation d'ordre permet de définir la notion d'intervalles de type $[a, b]$, $]a, b[$, $[a, b[$, $]a, b]$. \square

Proposition IV.1.19. Toute partie non vide majorée de \mathbb{R} admet une borne supérieure (voir définition IV.1.6).

Démonstration. Soit A une partie de \mathbb{R} majorée. On suppose dans un premier temps que A contient au moins un nombre strictement positif. Il existe

$$m_0 = \max_{a \in A} \{P_0(a)\} \geq 0,$$

où P_k associe à un réel sa k -ième décimale (ou sa troncature entière pour $k = 0$). On introduit $A_0 = \{a \in A, P_0(a) = m_0\}$, et l'on pose

$$m_1 = \max_{a \in A_0} \{P_1(a)\} \in \llbracket 0, 9 \rrbracket.$$

On construit ainsi par récurrence le nombre $M = m_0, m_1 m_2 \dots$ qui est une borne supérieure de A par construction. Si A ne contient que des nombres négatifs, on procède de façon analogue en considérant l'ensemble $-A$ et en remplaçant le max par un min. \square

Définition IV.1.20. (Supremum - infimum - maximum - minimum)

Soit A une partie de \mathbb{R} . On note $\sup(A)$ sa borne supérieure (on dit qu'elle vaut $+\infty$ si A n'est pas majoré). Si elle appartient à A , on l'appelle le plus grand élément de A , ou maximum de A , qu'on écrit $\max(A)$.

Si A est majoré, $M = \sup A$ si et seulement si M majore A et s'il existe une suite x_n d'éléments de A qui tend vers M . On appellera x_n une suite *maximisante*.

On définit symétriquement les notions d'infimum, de plus petit élément, et de suite *minimisante*.

Définition IV.1.21. (Addition sur les réels en écriture décimale)

On définit l'addition sur \mathbb{R} de la façon suivante : soient $a = a_0, a_1 \dots$ et $b = b_0, b_1 \dots$ deux éléments de \mathbb{R} positifs et proprement écrits. Pour alléger les notations, nous proposons de présenter la construction de la somme $c = c_0, c_1 \dots$ comme un algorithme informatique, c'est à dire en gardant la notation c_k pour désigner une quantité dont la valeur est susceptible de changer au fil de la construction. On pose dans un premier temps $c_k = a_k + b_k$, et l'on définit $\alpha = (\alpha_k)$ comme une suite identiquement nulle au départ. Si $c_k \geq 10$, on remplace sa valeur par $c_k - 10$ et l'on pose $\alpha_{k-1} = 1$. Noter que dans ce cas la nouvelle valeur de c_k est inférieure ou égale à 8 (car $a_k + b_k$ est inférieur ou égal à 18). Si c se termine par une infinité de 9 consécutifs (à partir d'un rang k), alors d'après la remarque précédente la zone en question est vierge de toute retenue, on nettoie l'écriture en mettant à 0 tous les 9, et l'on rajoute 1 à c_{k-1} , qui est donc au maximal égal à 9, et sans menace de retenue puisque α_{k-1} est nécessairement égal à 0 d'après ce qui précède. On obtient donc un $c = (c_k)$ qui est soit décimal, soit non décimal et non stationnaire à 9. L'étape finale consiste à prendre en compte les retenues dans la somme finale. On considère pour cela les suites (nécessairement finies) de 9 consécutifs. Considérons une de ses suites de longueur maximale⁷ $c_k c_{k+1} \dots c_\ell = 99 \dots 9$, encadrée donc par des décimales non égales à neuf. Toujours selon le même argument que la somme de deux naturels ≤ 9 est ≤ 18 , on a nécessairement

$$\alpha_{k-1} = \alpha_k = \dots = \alpha_{\ell-1} = 0.$$

Si $\alpha_\ell = 0$, on laisse la suite de 9 inchangée, et si $\alpha_\ell = 1$, on remplace tous les 9 par des 0, et l'on rajoute 1 à c_{k-1} (qui est ≤ 8 par hypothèse). En dehors de ces paquets de 0 l'ajout de α_k à c_k peut se faire directement. On obtient ainsi un nombre réel en écriture décimale, que l'on définit comme la somme de a et b .

Il s'agit maintenant de définir la somme entre un nombre positif et un nombre négatif. On commence par considérer un nombre de l'intervalle $] -1, 0[$, $a = -0, a_1 a_2 \dots$ (écriture propre), auquel on ajoute $+1$. Si a est décimal, $a = -0, a_1 a_2 \dots a_p$, la somme est définie comme

$$1 + a = 0, c_1 c_2 \dots c_p, \quad c_i = 9 - a_i \text{ pour } i = 1, \dots, p-1, \quad c_p = 10 - a_p.$$

Si le nombre est non décimal, on définit simplement la différence par $b_i = 9 - a_i$ pour tout i . On considère maintenant un réel $a > 0$ et un entier $b < 0$. On utilise la décomposition formelle (formelle car on n'a pas encore défini l'addition entre a et b)

$$a + b = a_0 + 0, a_1 a_2 \dots - b_0 = a_0 - b_0 + 0, a_1 a_2 \dots$$

7. C'est-à-dire qu'elle n'est pas contenue dans une suite de 9 strictement plus longue.

Si l'entier $a_0 - b_0$ est positif ou nul, on se ramène à la somme de deux réels positifs déjà définie. Si cet entier est strictement négatif, on définit la somme comme

$$a + b = -c_0, c_1 \dots \text{ avec } c_0 = |a_0 - b_0| - 1 \text{ et } 0, c_1 c_2 \dots = 1 - 0, a_1 a_2 \dots$$

(cette dernière somme a déjà été définie précédemment). Pour finir, on considère maintenant $a > 0$ et $b < 0$ non entier. On écrit

$$a + b = a_0 + 0, a_1 a_2 \dots - b_0 - 1 + (1 - 0, b_1 \dots) = a_0 - b_0 - 1 + 0, a_1 a_2 \dots + (1 - 0, b_1 b_2 \dots).$$

Le terme entre parenthèses a été défini précédemment comme un réel de l'intervalle $]0, 1[$. On sait effectuer sa somme avec $0, a_1 a_2 \dots$ (tous deux positifs). Si cette somme est dans l'intervalle $]0, 1[$, on se retrouve dans la situation précédente. Sinon, on l'écrit $1 + 0, d_1 d_2 \dots$, et l'on est une nouvelle fois ramené à donner un sens à la somme d'un entier $a_0 - b_0 - 1 + 1 = a_0 - b_0$ avec un nombre du type $0, d_1 d_2 \dots$, cas qui a déjà été traité.

Proposition IV.1.22. Soit (x_n) une suite de réels majorée et croissante. Alors (x_n) converge vers une limite $\ell \in \mathbb{R}$, qui est la borne supérieure de l'ensemble des termes de la suite.

Démonstration. L'ensemble X des termes de la suite est majoré, il admet donc une borne supérieure $\ell \in \mathbb{R}$, telle que $x_n \leq \ell$ pour tout n . Pour tout $\varepsilon > 0$, il existe un terme de la suite supérieur à $\ell - \varepsilon$. la suite étant croissante, tous les termes de la suite sont dans l'intervalle $]\ell - \varepsilon, \ell]$, d'où la convergence de x_n vers ℓ . \square

Pour toute suite (x_n) de réels, le supremum des x_k pour k plus grand que n est soit identiquement égal à $+\infty$ (si la suite n'est pas majorée), soit décroissant en n . Dans le second cas cette quantité converge donc vers $-\infty$ ou une limite réelle. De même l'infimum des x_k pour k plus grand que n est identiquement $-\infty$, ou réel croissant, et converge dans ce cas vers $+\infty$ ou une limite réelle. Ces conséquences directes de la proposition précédente permettent de définir les notions de \limsup et \liminf .

Définition IV.1.23. (Limite inférieure, limite supérieure (••))

Soit x_n une suite réelle, on définit

$$\limsup_{n \rightarrow +\infty} x_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\sup_{k \geq n} x_k \right) \in [-\infty, +\infty], \quad \liminf_{n \rightarrow +\infty} x_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\inf_{k \geq n} x_k \right) \in [-\infty, +\infty],$$

Exercice IV.1.3. (Limites supérieure et inférieure (•))

a) Donner les \limsup et \liminf de la suite (x_n) dans les cas suivants

$$x_n = \frac{1}{n}, \quad x_n = n, \quad x_n = (-1)^n, \quad x_n = (-1)^n, \quad x_n = \sin(n).$$

b) Que peut-on dire d'une suite dont la \liminf et la \limsup ont la même valeur finie ?

Exercice IV.1.4. (•) Soient (x_n) et (y_n) deux suites réelles. Montrer que

$$\sup_n (x_n + y_n) \leq \sup(x_n) + \sup(y_n).$$

Donner un exemple pour lequel il y a en fait égalité, et un exemple pour lequel l'inégalité est stricte.

Définition IV.1.24. (Convergence d'une suite de réels (•))

On dit qu'une suite (a_n) de réels tend vers 0 si sa valeur absolue peut être rendue arbitrairement petite au-delà d'un certain rang, c'est à dire :

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}, |a_n| < \varepsilon \quad \forall n \geq N.$$

On dit qu'une suite (a_n) de réels tend vers une limite a si $|a_n - a|$ tend vers 0.

Le fait d'avoir défini une relation d'ordre total et une addition sur \mathbb{R} permet de donner un sens à la définition générale d'une métrique, selon la définition I.2.1, page 7. Cette définition peut être appliquée à \mathbb{R} lui-même, pour définir la distance canonique basée sur la valeur absolue de la différence entre deux nombres.

Proposition IV.1.25. (Métrique sur \mathbb{R})

L'application $(x, y) \in \mathbb{R} \mapsto d(x, y) = |x - y|$ définit une distance sur \mathbb{R} .

Démonstration. La séparation est immédiate, ainsi que la symétrie. Soient maintenant 3 réels x, y , et z . Si $x - y$ et $y - z$ sont de même signe, on a

$$|x - y| + |y - z| = |x - z|,$$

et s'il sont de signes opposés, on a

$$|x - z| = |x - y + (y - z)| \leq \max(|x - y|, |y - z|) \leq |x - y| + |y - z|.$$

dans les deux cas, l'inégalité triangulaire est vérifiée. \square

Proposition IV.1.26. L'espace métrique (\mathbb{R}, d) est complet (voir définition I.5.3, page 15).

Démonstration. On considère une suite de Cauchy dans \mathbb{R} (défini par IV.1.14), notée⁸ (a^n) . La petite difficulté pour montrer que la suite converge est que, pour $n \in \mathbb{N}$, il est possible que a_k^n oscille entre deux valeurs successives, puisque deux nombres qui ne s'identifient que sur les $k-1$ premières décimales peuvent être arbitrairement proches. Plus précisément, si l'on fixe $r \in \mathbb{N}$, alors $|a - b| < 10^{-r}$ impose l'alternative suivante :

1. les décimales de a et b s'identifient jusqu'au rang $r-1$, et diffèrent d'une unité au r -ème rang ;
2. ces décimales diffèrent d'une unité dès un certain rang $\ell < r$, par exemple $b_\ell = a_\ell + 1$, et dans ce cas $a_i = 9$ et $b_i = 0$ pour $\ell + 1 \leq i \leq r$.

Considérons maintenant une suite de Cauchy dans \mathbb{R} en écriture décimale, $(a^n) = (a_k^n)$ (l'indice k représente comme précédemment les décimales, et n l'indice du terme de la suite). Si toutes les décimales se stabilisent au delà d'un certain rang, c'est qu'il existe $\ell = (\ell_k)$ tel que

$$\forall k \in \mathbb{N}, \exists N_k, \forall n \geq N_k, a_k^n = \ell_k,$$

on a alors convergence de a^n vers ℓ . Si ce n'est pas le cas, notons k_0 le plus petit des indices k tels que a_k^n ne se stabilise jamais. Comme a^p et a^q deviennent arbitrairement proches, d'après l'alternative énoncée ci-dessus, la décimale a_k^n oscille nécessairement entre deux valeurs distantes de 1, disons ℓ_k et $\ell_k + 1$, les indices précédents se stabilisant. D'après la remarque faite en préambule de cette démonstration, pour tout $r \in \mathbb{N}$ grand, tous les termes de la suite pour $n \geq r$ prennent nécessairement l'une ou l'autre des formes

$$\ell_0, \ell_1 \dots \ell_{k-1} \ell_k 999999 \dots 99 \underbrace{9}_{r-1} \dots \quad \text{ou} \quad \ell_0, \ell_1 \dots \ell_{k-1} (\ell_k + 1) 000000 \dots 00 \underbrace{0}_{r-1} \dots,$$

qui implique la convergence vers le décimal $\ell_0, \ell_1 \dots \ell_{k-1} (\ell_k + 1) 000 \dots$ (la première forme correspond à l'écriture impropre de ce même décimal). \square

Définition IV.1.27. (Produit de deux réels)

On définit le produit de deux réels par passage à la limite à partir du produit entre deux décimaux, qui lui-même découle du produit entre deux entiers. La démarche repose sur les trois étapes décrites suivantes :

8. On prendra garde à la notation a^n , où n ne représente pas une puissance mais un indice : $a^n \in \mathbb{R}$ désigne simplement le n -ième terme de la suite. Chaque terme a^n est lui-même défini par une infinité de chiffres, les a_k^n pour $k = 0, 1, \dots$

1. (Produit par une puissance de 10)

En premier lieu, nous définissons le produit entre un réel et une puissance de 10. Pour tout réel $a = a_0, a_1 a_2 \dots$, tout entier naturel n , on définit $10^n \times a$ comme le réel obtenu en décalant vers la droite la virgule de n pas. On définit $10^{-n} \times a$ comme le nombre obtenu en décalant la virgule de n pas vers la gauche.

2. (Produit entre deux décimaux)

Soient $a = a_0, a_1 \dots a_n$ et $b = b_0, b_1 \dots b_m$ deux nombres décimaux. On définit le produit $a \times b$ comme

$$a \times b = \underbrace{(10^n \times a)}_{\in \mathbb{N}} \times \underbrace{(10^m \times b)}_{\in \mathbb{N}} \times 10^{-m-n}.$$

3. (Produit entre deux réels)

Soient $a = +a_0, a_1 a_2 \dots$ et $b = +b_0, b_1 b_2 \dots$ deux nombres réels. Pour tous $n \geq 0$, $m \geq n$, on note $a_{n,m}$ le nombre décimal obtenu en ne conservant que les décimales entre n et m . Le nombre a est ainsi limite de la suite $(a_{0,n})$ quand n tend vers $+\infty$, de même pour b . Montrons que la suite de décimaux $(a_{0,n} \times b_{0,n})$ est de Cauchy dans \mathbb{R} . On a, pour tous p, q avec $p < q$,

$$\begin{aligned} a_{0,q} \times b_{0,q} - a_{0,p} \times b_{0,p} &= (a_{0,p} + a_{p+1,q}) \times (b_{0,p} + b_{p+1,q}) - a_{0,p} \times b_{0,p} \\ &= a_{p+1,q} \times b_{0,p} + a_{0,p} \times b_{p+1,q} + a_{p+1,q} \times b_{p+1,q}, \end{aligned}$$

qui est majoré en valeur absolue par $|b| \times 10^{-p} + |a| \times 10^{-p} + 10^{-2p}$, qui tend vers 0 quand p et q tendent vers $+\infty$. La suite $(a_{0,n} \times b_{0,n})$, de Cauchy, converge donc vers une limite. Le produit $a \times b$ est défini comme cette limite.

Définition IV.1.28. (Droite numérique achevée)

On appelle droite numérique achevée, et l'on note \mathbb{R} , l'ensemble $\overline{\mathbb{R}}$ auquel on rajoute deux points notés $+\infty$ et $-\infty$.

La relation d'ordre sur \mathbb{R} est étendue à $\overline{\mathbb{R}}$ par $-\infty < +\infty$ et, pour tout réel a , $-\infty < a < +\infty$.

IV.1.5 Inégalités fondamentales**Proposition IV.1.29.** (Inégalité arithmético-géométrique)

Soient x_1, \dots, x_n des réels positifs ou nuls, et $(\alpha_n) \in]0, +\infty[^n$ une famille de poids. On a

$$(x_1^{\alpha_1} \dots x_n^{\alpha_n})^{1/\alpha} \leq \frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i,$$

avec $\alpha = \sum \alpha_i$.

Démonstration. Par concavité de la fonction logarithme, on a

$$\frac{1}{\alpha} \sum \alpha_n \log x_n \leq \log \left(\frac{1}{\alpha} \sum \alpha_n x_n \right),$$

d'où l'inégalité en prenant l'exponentielle. □

Proposition IV.1.30. (Inégalité de Young)

Soient a et b deux réels positifs ou nuls, et p, q deux réels > 0 conjugués, i.e. tels que $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. On a alors

$$ab \leq \frac{a^p}{p} + \frac{b^q}{q}.$$

Démonstration. C'est une conséquence de l'inégalité arithmético-géométrique (proposition IV.1.29), avec $\alpha_1 = 1/p$, $\alpha_2 = 1/q$, $x_1 = a^p$, et $x_2 = b^q$. □

Proposition IV.1.31. (Inégalité de Hölder)

Soient p et q deux réels positifs conjugués, i.e. tels que $1/p + 1/q = 1$, et $\theta = (\theta_i) \in [0, +\infty[^d$. Pour tous $x = (x_i), y = (y_i) \in \mathbb{R}^d$, on a

$$\sum_{i=1}^d |\theta_i x_i y_i| \leq \left(\sum_{i=1}^d \theta_i |x_i|^p \right)^{1/p} \left(\sum_{i=1}^d \theta_i |y_i|^q \right)^{1/q}.$$

Démonstration. Remarquons en premier lieu que cette inégalité est 1-homogène vis à vis de x et y : si elle est valable pour x et y , elle est aussi valable pour λx et μy , quels que soient les réels λ et μ . Il suffit donc de la démontrer dans le cas particulier où $\sum \theta_i |x_i|^p = \sum \theta_i |y_i|^q = 1$, c'est-à-dire de montrer que, pour x et y ainsi normalisés, on a

$$\sum_{i=1}^d |\theta_i x_i y_i| \leq 1.$$

Cette inégalité résulte directement de l'inégalité de Young (proposition IV.1.30) :

$$\sum_{i=1}^d |\theta_i x_i y_i| \leq \sum_{i=1}^d \theta_i \left(\frac{|x_i|^p}{p} + \frac{|y_i|^q}{q} \right) = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^d \theta_i |x_i|^p + \frac{1}{q} \sum_{i=1}^d \theta_i |y_i|^q = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1,$$

ce qui conclut la preuve. \square

Proposition IV.1.32. (Inégalité de Minkovski)

Soit $p \in [1, +\infty]$, et $\theta = (\theta_i) \in [0, +\infty[^d$. Pour tous $x = (x_i), y = (y_i) \in \mathbb{R}^d$, on a

$$\left(\sum_{i=1}^d \theta_i |x_i + y_i|^p \right)^{1/p} \leq \left(\sum_{i=1}^d \theta_i |x_i|^p \right)^{1/p} + \left(\sum_{i=1}^d \theta_i |y_i|^p \right)^{1/p}.$$

Démonstration. L'inégalité est immédiate pour le cas $p = +\infty$. Pour $p \in [1, +\infty[$, on écrit

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^d \theta_i |x_i + y_i|^p &= \sum_{i=1}^d \theta_i |x_i + y_i| |x_i + y_i|^{p-1} \leq \sum_{i=1}^d \theta_i (|x_i| + |y_i|) |x_i + y_i|^{p-1} \\ &= \sum_{i=1}^d \theta_i |x_i| |x_i + y_i|^{p-1} + \sum_{i=1}^d \theta_i |y_i| |x_i + y_i|^{p-1}. \end{aligned}$$

On applique alors l'inégalité de Hölder (proposition IV.1.31) à chacun des deux termes de la somme avec les indices p et $p/(p-1)$, pour obtenir

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^d \theta_i |x_i + y_i|^p &\leq \left(\sum_{i=1}^d \theta_i |x_i|^p \right)^{1/p} \left(\sum_{i=1}^d \theta_i |x_i + y_i|^p \right)^{(p-1)/p} \\ &\quad + \left(\sum_{i=1}^d \theta_i |y_i|^p \right)^{1/p} \left(\sum_{i=1}^d \theta_i |x_i + y_i|^p \right)^{(p-1)/p}. \end{aligned}$$

On divise les deux membres de cette inégalité par $(\sum \theta_i |x_i + y_i|^p)^{1-1/p}$ (si cette quantité est nulle, l'inégalité à démontrer est trivialement vérifiée), pour obtenir l'inégalité annoncée. \square

IV.2 Pour aller plus loin (●●●●)

IV.2.1 Théorie des ensembles, cardinalité

Axiome IV.2.1. (Axiome du choix (●●●))

Soit $(X_i)_{i \in I}$ une famille d'ensembles. Il existe une application qui à chaque ensemble X_i associe un élément x_i de cet ensemble.

Théorème IV.2.2. (Cantor-Bernstein (●●●))

Si $X \lesssim Y$ et $Y \lesssim X$, on a $X \simeq Y$. En d'autres termes, s'il existe une injection de X dans Y , et une injection de Y dans X , alors il existe une bijection entre X et Y .

IV.2.2 Complété d'un espace métrique (●●●●)

Définition IV.2.3. Soit (X, d) un espace métrique. On appelle complété de cet espace la donnée d'un espace métrique complet (\bar{X}, \bar{d}) muni d'une isométrie

$$T : (X, d) \longrightarrow (\bar{X}, \bar{d})$$

dont l'image est dense dans \bar{X} .

Théorème IV.2.4. (Complété d'un espace métrique)

Tout espace métrique admet un complété, qui est unique à isométrie près.

Démonstration. Soit (X, d) un espace métrique. On munit l'espace des suites dans X de la relation d'équivalence

$$x = (x_n)_{n \in \mathbb{N}}, \quad x' = (x'_n)_{n \in \mathbb{N}}, \quad x \mathcal{R} x' \iff d(x_n, x'_n) \longrightarrow 0$$

On note C l'ensemble des suites de Cauchy dans X , et $\bar{X} = C / \mathcal{R}$ l'espace quotient. Pour \bar{x}, \bar{x}' dans \bar{X} , $(x_n) \in \bar{x}$, $(x'_n) \in \bar{x}'$, la quantité $d(x_n, x'_n)$ converge vers une limite qui ne dépend pas des représentants choisis. En effet, on a

$$d(x_p, x'_p) - d(x_q, x'_q) \leq d(x_p, x_q) + d(x_q, x'_q) + d(x'_q, x'_p) - d(x_q, x'_q) = d(x_p, x_q) + d(x'_q, x'_p)$$

qui tend vers 0 quand p, q tendent vers $+\infty$. On montre de la même manière que son opposé $d(x_q, x'_q) - d(x_p, x'_p)$ est majoré par une quantité qui tend vers 0. La valeur absolue de $d(x_p, x'_p) - d(x_q, x'_q)$ tend donc vers 0 quand p et q tendent vers $+\infty$. La suite $d(x_n, x'_n)$ est donc de Cauchy, donc converge vers une limite $\ell \in \mathbb{R}$. On montre immédiatement que cette limite ne dépend pas du représentant choisi du fait de l'adjacence des suites d'une même classe. On note $\bar{d}(\bar{x}, \bar{x}')$ cette limite.

On montre tout aussi immédiatement que $\bar{d}(\cdot, \cdot)$ est une distance sur \bar{X} .

On note T l'application qui à une suite constante dans X (donc de Cauchy) associe sa classe dans \bar{X} . Cette application est par construction une isométrie de X vers \bar{X} . Montrons que son image est dense dans \bar{X} . Soit \bar{x} une classe de \bar{X} , et (x_n) l'un de ses représentants. On note \bar{x}_n la classe de la suite constante égale à x_n . On a

$$\bar{d}(\bar{x}_n, \bar{x}) = \lim_q \bar{d}(x_n, x_q),$$

qui tend vers 0 quand n tend vers l'infini du fait du caractère de Cauchy de (x_n) .

Montrons maintenant que \bar{X} muni de \bar{d} est un espace métrique complet. On considère une suite (\bar{x}^n) de Cauchy dans \bar{X} . Pour tout n , comme on l'a vu précédemment, la classe \bar{x}^n peut être approchée

par la classe d'une suite constante écrite $\overline{u_n}$, avec $u_n \in X$, à $1/n$ près. On considère maintenant la suite $u = (u_n)$. Cette suite est de Cauchy par construction. En effet, on a

$$d(u_p, u_q) = \bar{d}(\overline{u_p}, \overline{u_q}) \leq \bar{d}(\overline{u_p}, \overline{x^p}) + \bar{d}(\overline{x^p}, \overline{x^q}) + \bar{d}(\overline{x^q}, \overline{u_q}) \leq \frac{1}{p} + \bar{d}(\overline{x^p}, \overline{x^q}) + \frac{1}{q}.$$

On note \bar{u} sa classe. On a

$$\bar{d}(\overline{x^n}, \bar{u}) \leq \bar{d}(\overline{x^n}, \overline{u_n}) + \bar{d}(\overline{u_n}, \bar{u}),$$

qui tend vers 0 par construction. □

IV.2.3 Topologie générale (●●●●)

Définition IV.2.5. (Topologie, ouverts, fermés)

Soit X un ensemble. On appelle topologie sur X la donnée d'une famille \mathcal{T} de parties de X , qu'on appelle les *ouverts*, telle que

- (i) l'ensemble vide et X appartiennent à \mathcal{T} ,
- (ii) toute union d'ouverts est un ouvert,
- (iii) toute intersection finie d'ouverts est un ouvert.

On appelle fermé le complémentaire d'un ouvert.

On appelle le couple (X, \mathcal{T}) un *espace topologique*.

Définition IV.2.6. (Finesse)

Soient \mathcal{T} et \mathcal{T}' deux topologie sur X . On dit que \mathcal{T}' est *plus fine* que \mathcal{T} si $\mathcal{T} \subset \mathcal{T}'$, i.e. si tout ouvert de \mathcal{T} est ouvert de \mathcal{T}' .

Définition IV.2.7. (Topologies discrète et grossière)

Tout ensemble X peut être muni de la topologie *discrète*, pour laquelle tout singleton, et donc toute partie, est un ouvert. Toute partie est donc à la fois ouverte et fermée pour la topologie discrète. C'est la plus fine des topologies dont on puisse équiper X . À l'opposé, pour la topologie *grossière*, seuls \emptyset et X sont des ouverts. C'est la topologie la moins fine.

Définition IV.2.8. (Voisinage)

Soit (X, \mathcal{T}) un espace topologique, et $x \in X$. On appelle voisinage de x toute partie de X qui contient un ouvert contenant x . On note $\mathcal{V}(x)$ l'ensemble des voisinage de x .

Définition IV.2.9. Une application d'un espace topologique (X, \mathcal{T}) dans un espace topologique (X', \mathcal{T}') est dite *continue* si l'image réciproque de tout ouvert est un ouvert.

Proposition IV.2.10. L'application identité de (X, \mathcal{T}') dans (X, \mathcal{T}) est continue si et seulement si \mathcal{T}' est plus fine que \mathcal{T} .

Définition IV.2.11. (Topologie induite)

Soit X un espace topologique et $A \subset X$. L'ensemble des intersections d'ouverts de X avec A munit A d'une topologie, appelée *topologie induite*.

Définition IV.2.12. (Connexité)

Soit X un espace topologique. On dit que X est *connexe* si les seules parties de X à la fois ouvertes et fermées sont X et \emptyset . On dit que $A \subset X$ est connexe si A muni de la topologie induite est connexe.

Proposition IV.2.13. L'espace X est connexe s'il n'admet aucune partition⁹ en deux ouverts.

Proposition IV.2.14. Une union de parties connexes d'intersection non vide est connexe.

Démonstration. Soit C l'union d'une famille $(C_i)_{i \in I}$ de parties connexes, et $x \in \cap C_i$. Considérons une partition de C pour la topologie induite :

$$C = (U_1 \cup U_2) \cap C,$$

où U_1 et U_2 sont des ouverts de X . Le point x est nécessairement dans l'un des deux ouverts, par exemple $x \in U_1$. Pour tout C_i , l'union disjointe des ouverts U_1 et U_2 recouvre C_i . Comme C_i est connexe, l'intersection d'un des deux ensembles avec C_i est nécessairement vide, comme ça ne peut pas être U_1 qui contient $x \in C_i$, c'est U_2 . On a donc $U_2 \cap C_i = \emptyset$ pour tout i . Ainsi C n'admet aucune partition en deux ouverts (non vides), C est donc connexe. \square

Définition IV.2.15. (Composantes connexes)

Soit X un espace topologique. Pour tout $x \in X$ on note C_x la plus grande partie connexe contenant x , définie comme l'union des connexes contenant x (qui est bien connexe d'après la proposition précédente). Pour $x \neq y$, on a $C_x = C_y$ ou $C_x \cap C_y = \emptyset$, toujours d'après la proposition précédente. On peut donc introduire la relation d'équivalence suivante : $x \mathcal{R} y$ si $C_x = C_y$. Les classes d'équivalence de cette relation sont appelées *composantes connexes* de X .

Remarque IV.2.16. Un espace connexe est un espace qui ne possède qu'une seule composante connexe, qui est lui-même tout entier. Pour la topologie discrète, tout ensemble X est *totalelement discontinu*, c'est à dire que la composante connexe de chaque point est réduite à lui-même. Pour la topologie grossière, tout ensemble est connexe.

9. On rappelle que les membres d'une partition doivent être non vides.

Chapitre V

Développements

Sommaire

V.1 Éléments d'optimisation	137
V.1.1 Définitions, conditions nécessaires / suffisantes d'optimalité	137
V.1.2 Contraintes non linéaires d'égalité	139
V.2 Entiers p-adiques	141
V.3 Distance de Gromov-Wasserstein	149
V.4 Dualité, convergence faible	151
V.4.1 Éléments d'analyse fonctionnelle	151
V.4.2 Dualité	151

V.1 Éléments d'optimisation

V.1.1 Définitions, conditions nécessaires / suffisantes d'optimalité

Définition V.1.1. (Coercivité)

Soit J une fonctionnelle définie d'une partie X non bornée de \mathbb{R}^d dans \mathbb{R} . On dit que J est coercive sur X si

$$\lim_{x \in X, \|x\| \rightarrow +\infty} J(x) = \infty.$$

Définition V.1.2. (Fonctionnelle convexe, strictement convexe)

Soit J une fonctionnelle définie d'un ensemble convexe X de \mathbb{R}^d dans \mathbb{R} . On dit que J est **convexe** sur X si

$$J((1 - \theta)x + \theta y) \leq (1 - \theta)J(x) + \theta J(y) \quad \forall x, y \in X, \theta \in]0, 1[.$$

On dit que J est *strictement convexe* si l'inégalité ci-dessus est stricte dès que $x \neq y$.

Proposition V.1.3. Soit J une fonctionnelle continue d'un fermé $F \subset \mathbb{R}^d$ dans \mathbb{R} . On suppose que l'une des conditions suivantes est vérifiée :

- (i) F est borné,
- (ii) la fonctionnelle J est coercive sur F .

Le minimum de J sur F est alors atteint, i.e.

$$\exists u \in F, J(u) = \min_{v \in F} J.$$

Si J est strictement convexe, ce minimiseur est unique.

Proposition V.1.4. Soit U un ouvert de \mathbb{R}^d , et J une fonctionnelle différentiable sur U . Si u est un minimum local de J sur U , alors $\nabla J(u) = 0$.

Démonstration. Pour tout $h \in H$, $u + \varepsilon h$ est dans U pour ε suffisamment petit en valeur absolue, on a donc

$$J(u + \varepsilon h) = J(u) + \varepsilon \langle \nabla J(u) | h \rangle + o(\varepsilon) \geq J(u),$$

d'où $\langle \nabla J(u) | h \rangle = 0$, pour tout h . On a donc $\langle \nabla J(u) | h \rangle = 0$. \square

La condition d'annulation du gradient assure le caractère minimisant sous certaines hypothèses de convexité :

Proposition V.1.5. (Condition suffisante d'optimalité)

Soit U un ouvert convexe de \mathbb{R}^d , et J une fonctionnelle différentiable sur U . On suppose que J est convexe sur U . Si $\nabla J(u) = 0$, alors u est un minimiseur global de J sur U .

Démonstration. Soit $v \in U$. On a, pour tout $\theta \in]0, 1]$,

$$J((1 - \theta)u + \theta v) \leq (1 - \theta)J(u) + \theta J(v),$$

d'où

$$J(v) - J(u) \geq \frac{1}{\theta} (J(u + \theta(v - u)) - J(u))$$

qui tend vers $\langle \nabla J(u), v - u \rangle = 0$ quand ε tend vers 0. \square

Proposition V.1.6. Soit J une fonctionnelle C^1 sur un ouvert U de $V = \mathbb{R}^n$. On suppose que J admet un minimum local sur $U \cap K$ en u , avec

$$K = u_0 + \ker B, \quad B \in \mathcal{M}_{md}(\mathbb{R}).$$

Il existe alors $\lambda \in \mathbb{R}^m$ tel que

$$\begin{cases} \nabla J(u) + B^* \lambda &= 0 \\ Bu &= Bu_0 \end{cases}$$

Démonstration. Soit $v \in \ker B$. Pour tout ε assez petit, on a

$$J(u + \varepsilon v) \geq J(u).$$

Pour v fixé, on a donc

$$J(u) + \varepsilon \nabla J(u) \cdot v + o(\varepsilon) \geq J(u),$$

d'où l'on déduit que $\nabla J(u) \cdot v = 0$. On a donc

$$\nabla J(u) \in K^\perp = (\ker B)^\perp = \text{im } B^*,$$

d'où la propriété annoncée. \square

V.1.2 Contraintes non linéaires d'égalité

On s'intéresse à la minimisation d'une fonctionnelle J sur un ouvert U de \mathbb{R}^d , sur un sous-ensemble défini par N contraintes :

$$K = \{ v \in \mathbb{R}^d, \varphi_i(v) = 0, i = 1, \dots, N \}.$$

Proposition V.1.7. (Multiplicateurs de Lagrange, contraintes d'égalité)

Soit $J : U \subset \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ une fonctionnelle C^1 sur l'ouvert U . Soit u un point de $U \cap K$ en lequel J réalise un minimum local de J sur $U \cap K$. On suppose que les gradients en u des fonctionnelles φ_i forment une famille libre. Il existe alors $\lambda_1, \dots, \lambda_N$, tels que

$$\nabla J(u) + \sum_{i=1}^N \lambda_i \nabla \varphi_i(u) = 0.$$

Démonstration. Le point-clé consiste à montrer que tout vecteur h orthogonal à tous les $\nabla \varphi_i(u)$, est une *direction admissible* en u , c'est à dire qu'il existe $\eta(t)$ défini dans un voisinage de 0, avec $\eta(0) = 0$, tel que $u + \eta(t) \in K$, et que la tangente en 0 soit h , c'est à dire que $\dot{\eta}(0) = h$. Si cette propriété est vraie, alors on peut écrire pour tout h orthogonal aux $\nabla \varphi_i(u)$, et η une trajectoire associée selon les considérations précédentes,

$$J(u + \eta(t)) \geq J(u)$$

pour tout t dans un voisinage de 0, d'où

$$\nabla J \cdot \dot{\eta}(0) = \nabla J \cdot h = 0.$$

Le gradient de J est ainsi orthogonal à l'orthogonal de $\text{vect}(\nabla \varphi_i(u))_i$, ce qui termine la preuve.

Montrons maintenant que tout vecteur h orthogonal à tous les $\nabla \varphi_i(u)$, est bien une *direction admissible* en u .

On note $g_i = \nabla \varphi_i(u)$, et

$$V = \text{vect}(g_1, \dots, g_N)^\perp.$$

Comme les vecteurs g_i forment une famille libre, V est de dimension $d - N$. On considère une base (h_1, \dots, h_{d-N}) de V , on note

$$x = (x_1, \dots, x_{d-N}) \in \mathbb{R}^{d-N}, \quad y = (y_1, \dots, y_N) \in \mathbb{R}^N$$

et l'on définit γ l'application

$$\gamma : (x, y) \in \mathbb{R}^d \mapsto \gamma(x, y) = u + x_1 h_1 + \dots + x_{d-N} h_{d-N} + y_1 g_1 + \dots + y_N g_N.$$

On notera γ_k l'application qui ne dépend que de x_k et des y_i , les autres x_j étant fixés à 0. Pour construire une courbe dans K qui passe par u , dont la tangente en u est h_k , on considère l'application

$$(x_k, y_1, y_2, \dots, y_N) \mapsto \varphi \circ \gamma_k(x_k, y_1, \dots, y_N),$$

où l'on note $\varphi(v)$ le vecteur de dimension N dont les composantes sont les $\varphi_i(v)$. Comme $u \in K$, l'application $\varphi \circ \gamma_k$ est nulle en 0. Montrons que l'on peut utiliser le théorème des fonctions implicites (théorème II.3.1, page 47) pour construire une courbe $(y_1, \dots, y_N) = y = y(x_k)$ au voisinage de $(x_k, y) = 0$ qui annule $\varphi \circ \gamma_k$, ce qui assurera l'appartenance de $\gamma_k(x_k, y)$ à K . La différentielle de la $i^{\text{ème}}$ composante de $\varphi \circ \gamma_k$ par rapport à y_j est

$$\frac{\partial(\varphi_i \circ \gamma_k)}{\partial y_j} = \nabla \varphi_i(x_k, y) \cdot g_j = \nabla \varphi_i(x_k, y) \cdot \nabla \varphi_j(0, 0).$$

Notons G la matrice dont les colonnes sont les gradients des φ_j en $\gamma_k(0, 0) = u$. Le gradient de l'application $\varphi \circ \gamma_k$ est ainsi $G^T G$, qui est inversible puisque les g_i forment une famille libre.

On a par ailleurs

$$\frac{\partial(\varphi_i \circ \gamma_k)}{\partial x_k} = \nabla \varphi_i(x_k, y) \cdot h_k, \quad \text{d'où} \quad \frac{\partial(\varphi \circ \gamma_k)}{\partial x_k} \Big|_{(0,0)} = G^T h_k.$$

On peut donc construire une courbe $y = y(t)$ dans un voisinage de 0 telle que

$$\varphi \circ \gamma_k(t, y(t)) = 0$$

c'est à dire que la courbe est dans K . La dérivée de y en 0 s'écrit, d'après le théorème des fonctions implicites,

$$\dot{y}(0) = -(\nabla(\varphi \circ \gamma_k))^{-1} \frac{\partial(\varphi \circ \gamma_k)}{\partial x_k} = (G^T G)^{-1} (G^T h_k)$$

qui est nul car h_k est orthogonal à tous les g_i . On a donc

$$\frac{d}{dt} \gamma_k(t, y(t)) \Big|_{t=0} = h_k + \dot{y}_1(0)g_1 + \cdots + \dot{y}_N(0)g_N = h_k,$$

ce qui termine la démonstration. □

Remarque V.1.8. La condition d'indépendance des gradients est essentielle dans la proposition précédente. On pourra par exemple considérer, dans \mathbb{R}^2 , $\varphi_1(x, y) = y$ et $\varphi_2(x, y) = y - x^2$. L'ensemble K est réduit au point $(0, 0)$, et n'importe quelle fonctionnelle dont le gradient en $(0, 0)$ n'est pas colinéaire à $(0, 1)$ invalide la proposition.

V.2 Entiers p -adiques

Cette section est consacrée à la construction du complété de \mathbb{N} pour une certaine métrique, appelée p -adique. Nous détaillons cette construction pour le cas $p = 2$, qui aboutit à l'espace dit des entiers 2-adiques, noté \mathbb{Z}_2 , dont on présente ci-dessous certaines propriétés.

Distance 2-adique sur \mathbb{N}

Définition V.2.1. (Valuation et valeur absolue 2-adiques)

Tout $a \in \mathbb{Z}$ non nul peut s'écrire de façon unique $a'2^k$, où $a' \in \mathbb{Z}$ est impair. On appelle $v_2(a) = k$ la *valuation* 2-adique de a , et l'on définit la valeur absolue 2-adique

$$|a|_2 = 2^{-v_2(a)}.$$

On pose $v_2(0) = +\infty$, et $|0|_2 = 0$.

On se place maintenant sur $X = \mathbb{N}$ l'ensemble des entiers naturels, et l'on définit

$$(a, b) \in \mathbb{N}^2 \mapsto d(a, b) = |b - a|_2.$$

On peut donner une expression équivalente de cette définition, en considérant que tout entier naturel a s'écrit (écriture dyadique)

$$a = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n 2^n, \quad a_n \in \{0, 1\}, \quad a_n \text{ nul au delà d'un certain rang.} \quad (\text{V.2.1})$$

Deux nombres a et b peuvent ainsi être écrits en base 2 sous la forme de suites finies (a_n) et (b_n) de 0 et de 1, et l'on a $d(a, b) = 2^{-n_{ab}}$, où

$$n_{ab} = \min \{n, a_n \neq b_n\}, \quad (\text{V.2.2})$$

pris égal à $+\infty$ si les bits de a et b s'identifient (i.e. si $a = b$). En effet, par définition de n_{ab} , on a

$$a - b = 2^{n_{ab}} c,$$

où $c \in \mathbb{Z}$ est impair.

Proposition V.2.2. L'application $d(\cdot, \cdot)$ est une distance sur \mathbb{N} , qui est *ultramétrique*, c'est-à-dire qu'elle vérifie l'inégalité triangulaire renforcée :

$$d(a, b) \leq \max(d(a, c), d(b, c)) \quad \forall a, b, c \in X.$$

Démonstration. La séparation est immédiate par hypothèse, et l'on a bien $d(a, b) = d(b, a)$. Pour l'inégalité triangulaire renforcée, on utilise la formulation (V.2.2). Pour tous entiers a, b, c , on considère les écritures dyadiques associées. Les $n_{ab} - 1$ premiers bits de a et b s'identifient par définition, ainsi que les $n_{bc} - 1$ premiers bits de b et c . Les premiers bits de a et c s'identifient donc au moins sur les $\min(n_{ab}, n_{bc}) - 1$ indices, d'où

$$n_{ac} \geq \min(n_{ab}, n_{bc}),$$

et ainsi

$$d(a, c) = 2^{-n_{ac}} \leq \max(2^{-n_{ab}}, 2^{-n_{bc}}) = \max(d(a, b), d(b, c)),$$

qui est l'inégalité ultramétrique annoncée, qui entraîne l'inégalité triangulaire usuelle. \square

Cette distance munit \mathbb{N} d'une distance, appelée *ultramétrique*, aux propriétés particulières (voir proposition V.2.6 et les suivantes).

Le diamètre de (\mathbb{N}, d) est 1, et ce diamètre est atteint en de multiples couples : tout entier impair est en particulier diamétralement opposé à 0, ainsi qu'à tout entier pair. La sphère unité (sphère de centre 0 et de rayon 1) est l'ensemble des nombres impairs. De façon générale, la sphère de centre 0 et de rayon 2^{-k} est l'ensemble des nombres du type $2^k b$, avec b impair. Ces sphères de centre 0 et de rayons 1, 1/2, 1/4, ..., et 0, réalisent une partition de \mathbb{N} (comme un emboîtement infini de poupées russes).

La suite (2^n) tend vers 0, ainsi que toute suite telle que l'exposant de 2 dans la décomposition en facteurs premiers des termes tend vers $+\infty$.

Nous terminons cette section par une propriété négative sur (\mathbb{N}, d) , qui justifie la démarche de complétion qui suit.

Proposition V.2.3. L'espace ultramétrique (\mathbb{N}, d) n'est pas complet.

Démonstration. Considérons la suite $(2^n - 1)$. Cette suite est de Cauchy pour $d(\cdot, \cdot)$. Si elle converge vers $a \in \mathbb{N}$, alors 2^n converge vers $a + 1$, d'où $a + 1 = 0$, équation qui n'admet pas de solution dans \mathbb{N} . \square

Remarque V.2.4. Noter que l'on aurait pu choisir comme espace de départ $X = \mathbb{Z}$ au lieu de \mathbb{N} , auquel cas le contre-exemple ci-dessus n'en est plus un, puisque $a + 1$ admet une solution dans \mathbb{Z} . Pour se convaincre qu'il manque plus à (\mathbb{N}, d) que les nombres négatifs pour être complet, on peut considérer par exemple la suite

$$a_N = \sum_{n=0}^{2N} a_n 2^n,$$

avec $a_n = n + 1 \bmod 2$ (alternance périodique de 1 et de 0). On a

$$a_N = \sum_{n=0}^N 2^{2n} = \frac{1 - 4^{N+1}}{1 - 4} = \frac{4^{N+1} - 1}{3}.$$

Cette suite est de Cauchy (comme toute série partielle de ce type). S'il existe $a \in \mathbb{N}$ tel que a_N converge vers a , alors on a

$$\left| \frac{4^{n+1} - 1}{3} - a \right|_2 \rightarrow 0 \Rightarrow |4^{n+1} - 1 - 3a|_2 = 0,$$

d'où $3a + 1 = 0$, équation qui n'admet pas de solution dans \mathbb{N} , ni dans \mathbb{Z} .

Complété de \mathbb{N}

Définition V.2.5. Le complété de \mathbb{N} (voir théorème IV.2.4) pour la distance définie ci-dessus est appelé ensemble des entiers 2-adiques. Il est noté \mathbb{Z}_2 .

L'écriture (V.2.1), qui permet de représenter tout entier comme une suite finie de 0 ou de 1 (écriture en base 2), permet de se faire une meilleure idée de \mathbb{Z}_2 , et de préciser à quoi correspondent certains de ses éléments. Considérons une suite (a^k) dans \mathbb{N} , de Cauchy pour $d(\cdot, \cdot)$. On peut écrire les termes

$$a^k = (a_0^k, a_1^k, a_2^k, \dots)$$

Si une suite est de Cauchy alors, comme dans le cas des réels en écriture décimale (voir la démonstration de la proposition IV.1.26), chacune des suites $(a_n^k)_k$ finit par se stabiliser à une valeur a_n . On peut donc

représenter la limite par une suite (infinie) de 0 et de 1. On écrira le nombre correspondant somme d'une série, ou en écriture flottante, avec la convention de placer les bits *avant* la virgule :

$$a = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n 2^n, \quad \text{ou} \quad a = \dots a_3 a_2 a_1 a_0, 0.$$

Considérons par exemple le nombre $\dots 111, 0$. On a

$$\dots 111, 0 = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\sum_{n=0}^N 2^n \right) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{1 - 2^{N+1}}{1 - 2} \right) = -1 - \lim_{N \rightarrow \infty} 2^{N+1}$$

qui tend donc selon les règles de calcul usuel vers un nombre qui n'est pas dans l'espace de départ, et qu'il est tentant de noter -1 .

La métrique induite sur \mathbb{Z}_2 est définie essentiellement de la même manière que sur \mathbb{N} . Pour deux éléments a et b de \mathbb{Z}_2 , si l'on note n_{ab} le plus petit indice pour lequel les bits diffèrent ($n_{ab} = +\infty$ si $a = b$), la distance entre a et b est simplement définie par $d(a, b) = 2^{-n_{ab}}$.

La distance sur \mathbb{Z}_2 définie ci-dessus hérite des propriétés ultramétriques de la distance de départ sur \mathbb{N} . L'espace \mathbb{Z}_2 possède donc des propriétés propres aux espaces ultramétrique, telles que celles énoncées ci-après.

Proposition V.2.6. Soit (X, d) un espace ultramétrique. Tout point d'une boule (ouverte ou fermée) est centre de cette boule.

Démonstration. Soient $x \in X$ et $r \in \mathbb{R}_+$. On considère $x' \in \overline{B}(x, r)$, i.e. tel que $d(x, x') \leq r$. Pour tout $y \in \overline{B}(x, r)$, on a

$$d(y, x') \leq \max(d(y, x), d(x, x')) \leq r, \quad \text{d'où} \quad y \in B(x', r).$$

On montre de la même manière que tout $y \in \overline{B}(x', r)$ est à distance de x inférieure ou égale à r , d'où l'identité de $\overline{B}(x', r)$. La démonstration est identique pour une boule ouverte. \square

Corollaire V.2.7. Soit (X, d) un espace ultramétrique. L'intersection entre deux boules est soit vide soit l'une des deux boules. Si les rayons sont les mêmes, deux boules sont donc soit disjointes, soit identiques.

Démonstration: Soit $B(x, r)$ et $B(x', r')$. Si y appartient aux deux boules, il est aussi centre de ces deux boules d'après ce qui précède, la plus petite est donc incluse dans la plus grande, avec égalité si les rayons sont les mêmes.

Proposition V.2.8. Soit (X, d) un espace ultramétrique. Toute boule ouverte est un fermé.

Démonstration. Si $r = 0$ (alors $B(x, r) = \emptyset$) ou si $B(x, r) = X$, c'est immédiat. Sinon, pour tout $y \in B(x, r)^c$, $B(x, r) \cap B(y, r) = \emptyset$ d'après la proposition précédente, d'où $B(y, x) \subset B(x, r)^c$. Le complémentaire de $B(x, r)$ est donc un ouvert, la boule ouverte elle-même est donc un fermé. \square

Proposition V.2.9. Un espace ultramétrique est totalement discontinu, au sens où chaque point s'identifie à sa propre composante connexe (définition IV.2.15).

Démonstration. Soient x et $y \neq x$ dans X , et $0 < r < d(x, y)$. La boule ouverte $B(x, r)$ et son complémentaire (qui est aussi un ouvert) réalisent une partition de X en 2 ouverts, x et y ne peuvent donc appartenir à la même composante connexe. \square

Proposition V.2.10. Soit (X, d) un espace ultramétrique. Tout triangle dans X est isocèle (avec deux grands côtés et un petit côté).

Proposition V.2.11. On considère trois points dans X , et l'on note ℓ_1, ℓ_2 , et ℓ_3 les longueurs des côtés. On a $\ell_1 \leq \max(\ell_2, \ell_3)$, et les mêmes propriétés obtenues en permutant les indices. Si les longueurs sont distinctes deux à deux, on a par exemple $\ell_1 < \ell_2 < \ell_3$, qui invalide $\ell_3 \leq \max(\ell_1, \ell_2)$. Deux des longueurs au moins sont donc identiques, par exemple $\ell_1 = \ell_2$. Le troisième côté est de longueur $\ell_3 \leq \max(\ell_1, \ell_2) = \ell_1$.

Proposition V.2.12. Soit (X, d) un espace ultramétrique. Une suite (x_n) est de Cauchy si et seulement si

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} d(x_{n+1}, x_n) = 0.$$

Addition sur \mathbb{Z}_2 . On peut définir une addition sur \mathbb{Z}_2 , qui est “l'addition de l'écolier” en partant de la droite dans l'écriture 2-adique ci-dessus. On considère deux entiers dyadiques a et b , et l'on cherche à construire la somme $c = a + b$, qui étende la somme sur \mathbb{N} . Si $a_0 + b_0 = 0$ ou 1 , on affecte à c_0 cette valeur, et on passe au rang suivant. Si la somme vaut 2 on pose $c_0 = 0$, et l'on garde une retenue de 1 pour le rang suivant. Au rang 1 on se retrouve dans la même situation, avec éventuellement une retenue de 1 en plus. La somme peut donc maintenant valoir 3 . Si c'est le cas on pose $c_1 = 1$ et on garde 1 de retenue pour le rang suivant, etc ...

De façon assez frappante, le fait de prendre le complété de \mathbb{N} pour la distance choisie, qui est une démarche purement topologique, conduit à un espace qui possède une structure algébrique que l'espace de départ n'avait pas.

Proposition V.2.13. L'espace \mathbb{Z}_2 muni de l'addition définie ci-dessus est un groupe additif.

Proposition V.2.14. L'espace \mathbb{Z}_2 n'est pas dénombrable.

Démonstration. Nous avons vu que tout élément de \mathbb{Z}_2 peut se représenter de façon unique par une suite infinie de 0 ou de 1 . On peut donc identifier (d'un point de vue ensembliste) \mathbb{Z}_2 à l'ensemble des parties de \mathbb{N} , en considérant la suite (a_n) comme la fonction indicatrice d'une partie de \mathbb{N} . L'ensemble \mathbb{Z}_2 n'est donc pas dénombrable d'après le théorème IV.1.10. \square

Définition V.2.15. (Ordre lexicographique)

On peut définir sur \mathbb{Z}_2 un ordre *lexicographique*, en considérant, pour deux éléments différents $\dots a_2 a_1 a_0, 0$ et $\dots b_2 b_1 b_0, 0$ le plus petit indice n pour lequel les deux diffèrent, et poser $a < b$ si $a_n < b_n$.

Noter que l'ordre défini ci-dessus est très différent de l'ordre usuel. Comme $\mathbb{Z} \subset \mathbb{Z}_2$, on peut comparer de ce point de vue deux éléments de \mathbb{Z} , on retrouve certaines propriétés usuelles du type $1 < 3$, $1 < 5$, mais aussi des choses plus déroutantes, comme $5 < 3$ et, plus globalement, s

$$0 \leq a \leq -1 \quad \forall a \in \mathbb{Z},$$

ce qui permet d'écrire

$$\mathbb{Z} = [0, -1].$$

Proposition V.2.16. L'espace \mathbb{Z}_2 est compact.

Démonstration. Considérons une suite (a^k) dans \mathbb{Z}_2 . On considère la suite $(a_0^k)_k$ de 0 et de 1 . Cette suite visite une infinité de fois 0 ou 1 (ou les deux). On prend a_0 égal à une valeur visitée une infinité de fois, et l'on extrait la sous-suite $(a^{\varphi_0(k)})$ correspondante. On procède de même avec $(a_1^{\varphi_0(k)})$, pour extraire une suite $(a^{\varphi_0 \circ \varphi_1(k)})$. On extrait ainsi des sous-suites emboîtées les unes dans les autres. On définit maintenant (selon le processus d'extraction diagonale dit de Cantor)

$$\varphi(k) = \varphi_0 \circ \varphi_1 \circ \dots \circ \varphi_k(k).$$

La suite ainsi construite est telle que $a_n^{\varphi(k)}$ a une valeur constante $a_n \in \{0, 1\}$ au-delà d'un certain rang (pour tout $k \geq n$), on a donc convergence de cette suite extraite vers $a = \dots a_3 a_2 a_1 a_0, 0$. \square

Système projectif, limite projective (●●●●)

Un *système projectif* désigne une famille (X_n) d'ensemble muni d'une famille d'applications $(f_n^m)_{n \leq m}$, avec $f_n^m : X_m \rightarrow X_n$, qui vérifient les propriétés suivantes

- (1) L'application f_n^n est l'identité sur X_n
- (2) Pour tous $n \leq m \leq q$, on a $f_n^m \circ f_m^q = f_n^q$.

On appelle limite projective l'ensemble des éléments du produit infini $X_0 \times X_1 \times \dots$ dont les projections sont compatibles avec les f_i^j au sens suivant :

$$\varprojlim \left((X_n), (f_i^j) \right) = \{ x = (x_0, x_1, x_2, \dots) \in X_0 \times X_1 \times \dots, f_n^m(x_m) = x_n \quad \forall i \leq j \}.$$

Pour tous $n \leq m$, on peut définir canoniquement¹ une surjection de $\mathbb{Z}/2^m\mathbb{Z}$ dans $\mathbb{Z}/2^n\mathbb{Z}$. On note f_n^m cette surjection. On peut identifier ainsi \mathbb{Z}_2 à la limite projective du système $((\mathbb{Z}/2^n\mathbb{Z}), (f_n^m))$.

Représentation des arbres dyadiques, application au poumon humain

Le poumon humain se présente comme un arbre constitués de bronches (appelée bronchioles pour les plus petites), structuré de façon dyadique : la trachée se divise en deux, chacune des branches filles se divise elle-même en deux, etc... Pour l'arbre respiratoire d'un adulte, le nombre de bifurcations est de l'ordre de 23, soit autour de $2^{23} \approx 8 \times 10^8$ bronchioles terminales, dont on appelle *feuilles* les extrémités libres. Pour diverses raison (construction d'un modèle homogénéisé du parenchyme, construction d'un opérateur de la ventilation, qui à un champ de pression aux feuilles associe un champ de flux, etc ...), il peut être intéressant *d'extrapoler* cet arbre vers un nombre de générations infini. La notion de feuille est alors remplacée par celle de *bout*, on parle de *l'espace des bouts*, chacun de ces bouts correspondant à un chemin centrifuge s'éloignant de la racine (entrée de la trachée). Il est naturel de coder chacun de ces chemins par une suite infinie de 0 et de 1, par exemple selon la convention par exemple (on se figurera une représentation avec la racine en haut, comme sur la figure V.2.1) : partant de la racine, si l'on part à gauche, on prend $a_0 = 0$, et $a_0 = 1$ si c'est à droite. On encode le "choix" à chaque étape par un nombre entre 0 et 1.

La figure V.2.1 représente la numérotation obtenue à chaque génération, où l'on a représenté chaque mot $(a_N \dots, a_0)$ par sa représentation entière $a = \sum a_n$.

On notera que cette numérotation ne correspond pas du tout à l'énumération linéaire 0, 1, ... Cette numérotation présente un énorme avantage par rapport à l'énumération linéaire, en cela qu'elle respecte la structure de l'arbre. Plus précisément, considérons deux feuilles de la 4-ième génération, d'indices a et b . Leur proximité *vis à vis de l'arbre*, qui correspondrait à un degré de parenté s'il s'agissait d'un arbre généalogique, ne dépend que de $|a - b|$, contrairement à ce qui se passerait pour la numérotation linéaire, comme on peut s'en convaincre facilement. Par exemple deux feuilles dont la différence d'indices est impaire appartiennent nécessairement à des lobes différents. Si la différence est divisible par 2, et pas par 4, les deux point appartiennent nécessairement tous deux à l'un des 4 sous-arbres issus de la génération 2, etc...

Plus précisément, si l'on considère l'arbre à 4 générations représenté sur la figure, qui présente $2^4 = 16$ feuilles, on peut identifier la métrique dyadique sur l'ensemble des feuilles (identifié à $\llbracket 0, 15 \rrbracket$

1. On peut considérer la relation d'équivalence sur $\mathbb{Z}/2^m\mathbb{Z}$ définie par $z \mathcal{R} z' \iff z \equiv z' \pmod{2^n}$. L'espace quotient s'identifie à $\mathbb{Z}/2^n\mathbb{Z}$.

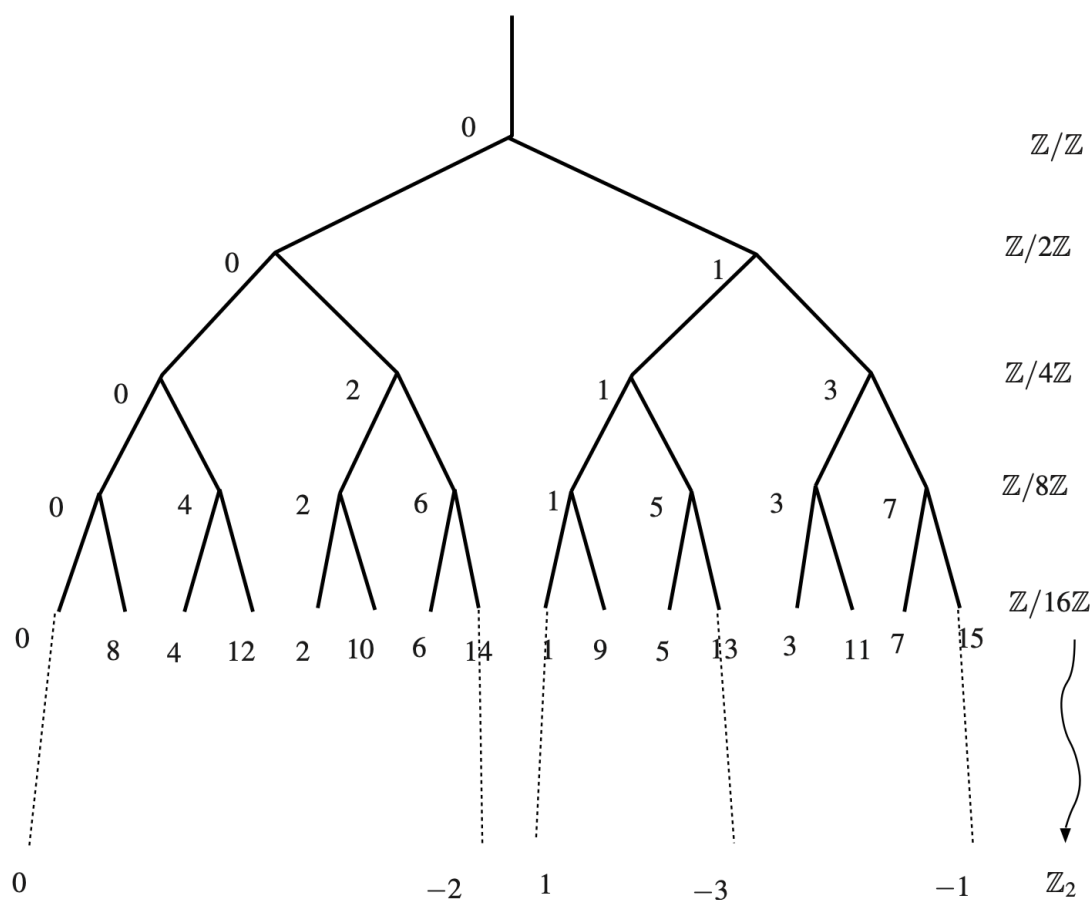


FIGURE V.2.1 – Numérotation 2-adique

ou $\mathbb{Z}/2^4\mathbb{Z}$) avec la métrique du plus court chemin au travers de l'arbre considéré comme un graphe pondéré. Pour retrouver exactement la distance 2-adique, on peut vérifier qu'il suffit de considérer que les arêtes des deux dernières générations (3 et 4) ont pour longueur $1/16$, longueur $1/8$ pour la génération 2 (4 branches), et $1/4$ pour la génération 1.

Si l'on considère maintenant le poumon infini, on voit apparaître des indices déjà identifiés pour certains bouts. Par exemple le bout le plus à gauche est clairement 0. Pour le bout correspondant au chemin le plus à droite, on retrouve notre $\dots 1111, 0 = -1$. Noter que -1 est le plus "grand" élément de \mathbb{Z}_2 pour la relation d'ordre lexicographique (voir définition V.2.15), et 0 le plus petit. De façon générale, la représentation de la figure V.2.1 correspond à cet ordre (croissant de la gauche vers la droite).

On notera que, pour tout sous-arbre infini, le bout le plus à gauche est un entier positif, et le bout le plus à droite un entier négatif.

Nombres entiers p -adiques

On peut généraliser cette approche en remplaçant 2 par un nombre p premier quelconque : tout $a \in \mathbb{Z}$ non nul peut s'écrire de façon unique $a'p^k$, où $a' \in \mathbb{Z}$ n'est pas divisible par p . On appelle

$v_p(a) = k$ la *valuation* p -adique de a , et l'on définit la valeur absolue p -adique

$$|a|_p = p^{-v_p(a)}.$$

On pose $v_p(0) = +\infty$, et $|0|_p = 0$. Cette valeur absolue vérifie $|ab|_p = |a|_p |b|_p$.

On peut définir de la même manière que précédemment une distance d_p sur \mathbb{N} , et considérer le complété de \mathbb{N} pour cette distance, que l'on note \mathbb{Z}_p .

L'identification des éléments de \mathbb{Z}_p peut se faire à partir de la décomposition d'un entier en base p :

$$a = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n p^n, \quad a_n \in [0, p-1] \quad \forall n, \quad a_n = 0 \text{ au-delà d'un certain rang.}$$

Un élément de \mathbb{Z}_p peut ainsi s'écrire comme une série infinie du type de celle ci-dessus, ou simplement codée par ses coefficients (on garde la convention d'une infinité de chiffres *avant* la virgule)

$$a = \dots a_2 a_1 a_0, 0.$$

Noter que cette complétion et l'identification à des nombres écrits en base p avec une infinité de chiffres avant la virgule ne nécessite pas que p soit premier. Si p n'est pas premier, on perd la propriété $|ab|_p = |a|_p |b|_p$, par exemple $|2 \times 5|_{10} = 10^{-1}$ alors que $|2|_{10} = |5|_{10} = 1$. Mais tant que l'on s'en tient à des aspects métriques, et que l'on se contente d'additionner les nombres entre eux, la construction est valide. On peut en particulier construire l'objet \mathbb{Z}_{10} des entiers 10-adiques, qui présente une forte analogie apparente (le codage semble le même, à symétrie près) avec l'ensemble des réels de l'intervalle $[0, 1]$, mais qui présente des propriétés très différentes. Pour l'anecdote, si l'on considère la relation d'ordre lexicographique sur \mathbb{Z}_{10} , son plus grand nombre est (on notera que l'infinité de 9 avant la virgule n'est pas ici pathologique, le codage de \mathbb{Z}_{10} est tout à fait injectif, contrairement au codage décimal des réels)

$$\dots 9999, 0 = \sum_{n=0}^{+\infty} 9 \times 10^n = 9 \frac{1}{1-10} = -1,$$

de telle sorte que l'on peut écrire $\mathbb{Z}_{10} = [0, -1]$ (*sic*).

On se restreint néanmoins en général aux nombres premiers, qui permettent des développements très féconds dans un cadre algébrique. Si l'on se restreint ainsi aux nombres premiers, on a une formule à la fois spectaculaire et très simple à établir, qui relie toutes les valeurs absolues p -adiques entre elles. Plus précisément, si l'on note $|\cdot|_\infty$ la valeur absolue usuelle sur \mathbb{Z} , on a

$$\forall a \in \mathbb{Z}, \quad |a|_\infty \prod_{p \text{ premier}} |a|_p = 1.$$

On notera que pour p assez grand (notamment plus grand que $|a|$), on a $|a|_p = 1$, le produit ci-dessus peut donc en fait se ramener à un produit fini, dont la définition ne nécessite donc pas d'arguments topologiques.

Mesure sur \mathbb{Z}_2 , sur \mathbb{Z}_p

Nous décrivons dans cette section la démarche permettant de construire une mesure sur \mathbb{Z}_2 . Le rôle joué par les intervalles dans le cas réel est ici joué par les boules. Nous privilégierons les boules fermées $\overline{B}(a, 2^{-k})$, en gardant en tête que ce sont aussi des boules ouvertes. En effet les valeurs prises par la distance étant quantifiées (ce sont les 2^{-k}), on a $B(a, 2^{-k}) = \overline{B}(a, 2^{-(k-1)})$. On notera que la boule fermée de centre a et de rayon 2^{-k} s'écrit aussi

$$a + 2^k \mathbb{Z}_2 = \{a + 2^k z, z \in \mathbb{Z}_2\} = \{\dots a_{k-1} a_{k-2} \dots a_0\}$$

c'est-à-dire l'ensemble des éléments de \mathbb{Z}_2 dont l'écriture 2-adique commence comme celle de a (au moins jusqu'au rang $k-1$).

Nous noterons $\mathcal{B} = \mathcal{B}(\mathbb{Z}_2)$ la tribu des boréliens sur \mathbb{Z}_2 , i.e. la tribu engendrée par les ouverts de \mathbb{Z}_2 .

Proposition V.2.17. La tribu \mathcal{B} des boréliens est engendrée par les $a + 2^k\mathbb{Z}_2$, avec a et k parcourant \mathbb{N} .

Démonstration. Montrons en premier lieu que tout ouvert est réunion dénombrable de boules (fermées!). Soit un ouvert U de \mathbb{Z}_2 , et $a \in U$. Il existe k tel que $a + 2^k\mathbb{Z}_2 \subset U$. Notons $\bar{a} \in \mathbb{N}$ la troncature de a au rang k , i.e.

$$\bar{a} = \sum_{n=0}^{k-1} a_n 2^n.$$

On a $a + 2^k\mathbb{Z}_2 = \bar{a} + 2^k\mathbb{Z}_2$. L'ouvert U est donc union de boules du type $a + 2^{-k}\mathbb{Z}_2$, il s'agit donc d'une union dénombrable^{2,3}. Noter, même si ça n'est pas nécessaire dans la démonstration, qu'on peut ne garder qu'une seule boule par $a \in \mathbb{N}$ impliqué, du fait que deux boules sont soit disjointes soit concentriques (l'une dans l'autre). On peut donc "coder" un ouvert de \mathbb{Z}_2 par une suite $(a_i, k_i)_i$ dans \mathbb{N}^2 . Cette propriété implique que la tribu engendrée par les $a + 2^k\mathbb{Z}_2$, contient la tribu des boréliens, et donc s'identifie à elle du fait qu'il s'agit d'ouverts. \square

On cherche maintenant à définir une mesure μ sur \mathbb{Z}_2 , qui affecte une masse 1 à \mathbb{Z}_2 . Nous verrons qu'il est possible de définir une telle mesure sur la tribu borélienne. Du fait que \mathbb{Z}_2 est union disjointe de 2^k boules fermés de rayon 2^{-k} , on affecte le volume 2^{-k} à toute boule ouverte de rayon 2^{-k} . Il peut sembler étonnant d'affecter un volume égal au *rayon*, mais on se souviendra que dans ce contexte ultramétrique, le rayon est égale au diamètre.

On se propose maintenant de construire, à partir de cette définition du volume sur le π -système des $a + 2^k\mathbb{Z}_2$, une mesure extérieure sur \mathbb{Z}_2 , en suivant la démarche décrite sur \mathbb{R} dans la proposition III.4.6, page 81.

Proposition V.2.18. Pour tout $A \subset \mathbb{Z}_2$, on note C_A l'ensemble des suites de boules fermées dont l'union recouvre A :

$$C_A = \left\{ (a_i + 2^{k_i}\mathbb{Z}_2)_{i \in \mathbb{N}}, A \subset \bigcup_{\mathbb{N}} (a_i + 2^{k_i}\mathbb{Z}_2) \right\}.$$

On autorise les rayons à être nul (i.e. $k = +\infty$), ce qui autorise à considérer des collections avec un nombre fini de boules de volume non nul. On définit alors $\mu^* : \mathcal{P}(\mathbb{Z}_2) \rightarrow [0, +\infty]$ par

$$\lambda^*(A) = \inf_{C_A} \left(\sum_i 2^{-k_i} \right). \quad (\text{V.2.3})$$

Cette application est une mesure extérieure, et elle attribue à toute boule fermée de rayon 2^{-k} la valeur 2^{-k} .

Démonstration. Cette démonstration est parfaitement analogue⁴ à celle de la proposition III.4.6, page 81. En premier lieu $\mu^*(\emptyset) = 0$. Pour la monotonie,

Considérons maintenant une collection (A_n) de parties de \mathbb{Z}_2 . On peut trouver pour chaque partie une collection de boules qui la recouvre, et telle que la somme des volumes approche $\mu^*(A_n)$ à $\varepsilon/2^n$ près. Comme dans la démonstration de la proposition III.4.6, page 81, cela permet d'établir que

$$\mu^*\left(\bigcup A_n\right) \leq \sum \mu^*(A_n) + 2\varepsilon,$$

4. Elle s'applique d'ailleurs à toute construction d'une mesure extérieure par l'extérieur précisément, basée sur ce principe de recouvrement par des objets donc on a fixé la taille.

et ce pour tout ε . On en déduit la sous-additivité.

Montrons maintenant que cette mesure extérieure affecte 2^{-k} aux boules fermées de rayon 2^{-k} . Soit $B = a + 2^k \mathbb{Z}_2$ une telle boule. En premier lieu, la boule est recouverte par elle-même, d'où $\mu^*(B) \leq 2^{-k}$. Maintenant considérons un recouvrement de B par des boules. Ces boules fermées étant des ouverts, et B étant compacte, on peut en extraire un recouvrement fini, on peut enlever les boules qui sont incluses dans une autre du recouvrement, pour obtenir (d'après le corollaire V.2.7) une partition finie, telle que la somme des volumes est exactement 2^{-k} . \square

On considère maintenant \mathcal{A} la tribu des parties mesurables pour μ^* (selon la définition III.4.2, page 78), et l'on note μ la mesure définie sur \mathcal{A} issue de μ^* , selon le théorème III.4.4, page 79. Il s'agit maintenant de montrer que la tribu \mathcal{A} contient la tribu des boréliens. Comme dans le cas réel (voir proposition III.4.8, page 83), il suffit de vérifier que les boules fermées, qui engendrent \mathcal{A} , sont mesurables.

Proposition V.2.19. La tribu \mathcal{A} des parties mesurables pour μ^* contient les boules fermées, donc les boréliens. La mesure μ introduite ci-dessus est ainsi définie sur la tribu des boréliens.

Démonstration. Soit $B = a + 2^k \mathbb{Z}_2$ une boule fermée. Il s'agit de montrer que pour toute partie $A \subset \mathbb{Z}_2$,

$$\mu^*(A) \geq \mu^*(A \cap B) + \mu^*(A \cap B^c).$$

On considère un recouvrement de A par des boules fermées $B_n = a_n + 2^{k_n} \mathbb{Z}_2$, avec

$$\sum 2^{-k_n} \leq \mu^*(A) + \varepsilon.$$

Il s'agit de distribuer au mieux chacune de ces boules entre B et B^c . Là encore, la preuve est plus simple que dans le cas réel. Soit une telle boule B_n . Si elle ne rencontre pas B , alors soit incluse dans B^c , auquel cas on l'affecte à B^c . Si elle rencontre B , alors soit elle est incluse dans A , auquel cas on l'affecte à A soit, du fait de l'ultramétrie, elle contient B . Son rayon est 2^{-k_n} , avec $k_n < k$. La boule B_n peut alors s'écrire, comme toute boule fermée, comme réunion disjointe de 2^{k-k_n} boules fermées de rayon 2^{-k_n} (l'une d'elle étant B). On atomise donc la boule B_n en 2^{k-k_n} boules plus petites, on affecte la boule qui s'identifie à B à B , et l'on affecte les $2^{k-k_n} - 1$ autres à B^c , ce qui se fait sans augmenter la masse totale. On construit ainsi à partir du recouvrement de A deux recouvrements de $A \cap B$ et $A \cap B^c$, respectivement, sans changer la masse totale, d'où l'on déduit que

$$\mu^*(A \cap B) + \mu^*(A \cap B^c) \leq \sum 2^{-k_n} \leq \mu^*(A) + \varepsilon$$

pour tout ε , d'où la propriété. \square

V.3 Distance de Gromov-Wasserstein

Définition V.3.1. Soient (X, d, μ) et (X', d', μ') deux espaces métriques finis probabilisés (i.e. munis d'une mesure définie sur la tribu discrète, de masse totale 1). On dit que ces espaces sont isomorphes s'il existe une bijection de X vers X' qui préserve les structures de distance et de mesure, i.e. s'il existe une isométrie T telle que

$$T_{\#}\mu = \mu' \quad \text{i.e.} \quad \mu'(A') = \mu(T^{-1}(A')) \quad \forall A' \in \mathcal{P}(X').$$

Soient (X, d, μ) et (X', d', μ') deux espaces métriques probabilisés et finis, de cardinaux respectifs N et N' , munis de leurs tribus discrètes respectives. On suppose que μ et μ' sont toutes deux de masse 1 (mesures de probabilité). On note Π l'ensemble des plans de transport entre μ et μ' :

$$\Pi = \left\{ \gamma = (\gamma_{xx'}) \in \mathbb{R}_+^{N \times N'}, \sum_x \gamma_{xx'} = \mu'_{x'}, \sum_{x'} \gamma_{xx'} = \mu_x \right\}.$$

Définition V.3.2. Pour $p \in [1, +\infty[$, on définit

$$d_{GW_p}(X, X') = \inf_{\gamma \in \Pi} \left(\sum_{xx'} \sum_{yy'} |d(x, y) - d(x', y')|^p \gamma_{xx'} \gamma_{yy'} \right)^{1/p}.$$

Lemme V.3.3. L'infimum de la définition précédente est atteint.

Démonstration. L'ensemble admissible Π est compact, et l'application

$$\gamma \mapsto \left(\sum_{xx'} \sum_{yy'} |d(x, y) - d(x', y')|^p \gamma_{xx'} \gamma_{yy'} \right)^{1/p}$$

est continue. \square

Proposition V.3.4. La quantité définie ci-dessus est une distance sur l'ensemble des espaces métriques probabilisés finis (quotienté par les isomorphismes au sens de la définition V.3.1)

Démonstration. Si l'on a $d_{GW_p}(X, X') = 0$ alors, pour tous x, x', y, y' tels que $\gamma_{xx'} \neq 0$ et $\gamma_{yy'} \neq 0$, on a $d(x, y) = d(x', y')$. Soit maintenant x, x', y' , tels que x envoie de la masse à x' et y' . On a $d(x', y') = d(x, x) = 0$, d'où $x' = y'$. Pour chaque x il existe donc unique x' tel que $\gamma_{xx'} \neq 0$, et l'on a donc $\gamma_{xx'} = \mu_x$. On peut mener le même raisonnement dans l'autre sens : pour chaque x' il existe un unique x tel que $\gamma_{xx'} \neq 0$, et l'on a donc $\gamma_{xx'} = \mu_{x'}$. Le plan de transport γ correspond donc à une bijection T entre X et X' , et l'on a

$$\begin{aligned} 0 = d_{GW_p}(X, X') &= \left(\sum_{xx'} \sum_{yy'} |d(x, y) - d(x', y')|^p \gamma_{xx'} \gamma_{yy'} \right)^{1/p} \\ &= \left(\sum_x \sum_y |d(x, y) - d(T(x), T(y))|^p \right)^{1/p} \end{aligned}$$

La symétrie est immédiate d'après la définition.

Pour l'inégalité triangulaire, on considère 3 espaces métriques probabilisés X, X' , et X'' , et des plans de transport $(\gamma_{xx'})$ et $(\gamma_{x'x''})$ qui réalisent les distance entre X et X' et entre X' et X'' , respectivement. On construit à partir de ces plans un plan entre X et X'' (non nécessairement optimal, mais qui suffira pour l'inégalité triangulaire) en "collant" dans un premier temps les plans, puis en condensant l'espace X' intermédiaire. Plus précisément, on introduit

$$\gamma_{xx'x''} = \frac{\gamma_{xx'} \gamma_{x'x''}}{\mu_{x'}},$$

et l'on définit

$$\gamma_{xx''} = \sum_{x' \in X'} \gamma_{xx'x''}.$$

On a

$$\sum_{xx''} \sum_{yy''} |d(x, y) - d(x'', y'')| \gamma_{xx''} \gamma_{yy''} = \sum_{xx''} \sum_{yy''} |d(x, y) - d(x'', y'')| \sum_{x'} \frac{\gamma_{xx'} \gamma_{x'x''}}{\mu_{x'}} \sum_{y'} \frac{\gamma_{yy'} \gamma_{y'y''}}{\mu_{y'}}.$$

On écrit $|d(x, y) - d(x'', y'')| \leq |d(x, y) - d(x', y')| + |d(x', y') - d(x'', y'')|$, ce qui permet de majorer la quantité de départ par deux termes. le premier s'écrit

$$\sum_{xx''} \sum_{yy''} |d(x, y) - d(x', y')| \sum_{x'} \frac{\gamma_{xx'} \gamma_{x'x''}}{\mu_{x'}} \sum_{y'} \frac{\gamma_{yy'} \gamma_{y'y''}}{\mu_{y'}}$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_x \sum_y |d(x, y) - d(x', y')| \sum_{x'} \frac{\gamma_{xx'}}{\mu_{x'}} \underbrace{\sum_{x''} \gamma_{x'x''}}_{\mu_{x'}} \sum_{y'} \frac{\gamma_{yy'}}{\mu_{y'}} \underbrace{\sum_{y''} \gamma_{y'y''}}_{\mu_{y'}} \\
&= \sum_x \sum_y |d(x, y) - d(x', y')| \sum_{x'} \gamma_{xx'} \gamma_{yy'} = d_{GW}(X, X').
\end{aligned}$$

Le second terme s'identifie de la même manière à $d_{GW}(X'X'')$

□

V.4 Dualité, convergence faible

V.4.1 Éléments d'analyse fonctionnelle

Définition V.4.1. (Espace de Banach)

Soit E un espace vectoriel normé (e.v.n.). Si E est complet pour la distance associée à la norme, on dit que E est un espace de Banach.

Proposition V.4.2. Soit F une application linéaire de E dans F , deux espaces vectoriels normés. Alors F est continue si et seulement si elle est bornée sur la boule unité de E . On note $\mathcal{L}(E, F)$ l'espace vectoriel des applications linéaires continues de E dans F . C'est un e.v.n. pour la norme d'opérateur

$$\|T\| = \sup_{x \neq 0} \frac{\|Tx\|_F}{\|x\|_E}.$$

Si F est complet, alors $\mathcal{L}(E, F)$ est un espace de Banach.

Définition V.4.3. (Dual topologique)

Soit E un espace vectoriel normé (e.v.n.). On appelle dual topologique de E , et l'on note E' , l'ensemble des formes linéaires (applications linéaires à valeurs dans \mathbb{R}) continues. C'est un e.v.n. pour la norme

$$\|\varphi\| = \sup_{x \neq 0} \frac{|\langle \varphi, x \rangle|}{\|x\|_E}.$$

Remarque V.4.4. Si E est de dimension finie, toutes les formes linéaires sont continues. Ce n'est pas le cas en dimension infinie. Considérer par exemple l'espace vectoriel X des suites nulles au-delà d'un certain rang, muni de la norme $\|\cdot\|_\infty$. La forme

$$\varphi : u = (u_n) \mapsto \sum_{n=1}^{+\infty} u_n$$

(on gardera en tête qu'il s'agit en fait d'une somme *finie*) n'est pas bornée sur la boule unité, elle n'est donc pas continue⁵.

V.4.2 Dualité

Soient E et F deux e.v.n., et Ψ une forme bilinéaire continue sur $E \times F$. On peut associer canoniquement à Ψ une application (linéaire et continue) de F dans E' , le dual topologique de E (espace des formes linéaires continues) :

$$y \in F \mapsto Ty \in E', \quad \langle Ty, x \rangle = \Psi(x, y) \quad \forall x \in E. \quad (\text{V.4.1})$$

5. On notera que l'exemple choisi s'appuie sur un e.v.n. qui n'est pas complet. De fait, on s'épargnera de chercher à construire un exemple explicite d'application linéaire non continue sur un espace complet, une telle construite ne peut qu'être abstraite et nécessite l'axiome du choix.

Proposition V.4.5. Soient E et F deux espaces vectoriels normés. Si E est séparable⁶, alors de toute suite (y_n) bornée dans F on peut extraire une suite $(y_{n'})$ qui converge au sens suivant :

$$\exists \varphi \in E', \quad T y_{n'} \xrightarrow{\star} \varphi,$$

où T est définie par (V.4.1). Autrement dit, il existe $\varphi \in E'$ telle que

$$\psi(x, y_{n'}) \longrightarrow \langle \varphi, x \rangle \quad \forall x \in E.$$

Démonstration. Il existe une famille dénombrable $\{x_k\}_{k \in \mathbb{N}}$ dense dans E . On se propose de suivre le procédé d'extraction diagonale de Cantor.

1. Comme $\Psi(x_1, y_n)$ est bornée dans \mathbb{R} on peut extraire une suite $y_{j_1(n)}$ telle que $\Psi(x_1, y_{j_1(n)})$ converge.
2. Comme $\Psi(x_2, y_{j_1(n)})$ est bornée dans \mathbb{R} on peut extraire de $y_{j_1(n)}$ une suite $y_{j_1 \circ j_2(n)}$ telle que $\Psi(x_2, y_{j_1 \circ j_2(n)})$ converge.
3. Par récurrence, on construit une suite de sous-suites emboîtées $y_{j_1 \circ j_2 \circ \dots \circ j_k(n)}$ telle que $\Psi(x_k, y_{j_1 \circ j_2 \circ \dots \circ j_k(n)})$ converge, pour tout k .
4. On utilise à présent le procédé d'extraction diagonale : on pose $j(k) = j_1 \circ j_2 \circ \dots \circ j_k(k)$ (de telle sorte que j est strictement croissante), et on considère $y_{j(n)}$. Pour tout k , on remarque que $y_{j(n)}$, à partir du rang k , est aussi une suite extraite de $(y_{j_1 \circ j_2 \circ \dots \circ j_k(n)})$, de telle sorte que $\Psi(x_k, y_{j(n)})$ converge lorsque $n \rightarrow +\infty$.
5. On utilise pour finir la densité des x_k pour montrer que, pour tout $x \in H$, $\Psi(x, y_{j(n)})$ est une suite de Cauchy. Soit $\varepsilon > 0$, il existe (x_k) tel que $|x - x_k| < \varepsilon$. Comme $\Psi(x_k, y_{j(n)})$ est de Cauchy, il existe un N au-delà duquel $|\Psi(x_k, y_{j(p)}) - \Psi(x_k, y_{j(q)})| < \varepsilon$. Pour tous p, q supérieurs à N , on a donc

$$\begin{aligned} & |\Psi(x, y_{j(p)}) - \Psi(x, y_{j(q)})| \\ & \leq |\Psi(x, y_{j(p)}) - \Psi(x_k, y_{j(p)})| + |\Psi(x_k, y_{j(p)}) - \Psi(x_k, y_{j(q)})| + |\Psi(x_k, y_{j(q)}) - \Psi(x, y_{j(q)})| \\ & \leq (1 + 2C \|\Psi\|)\varepsilon, \end{aligned}$$

où $\|\Psi\|$ est la constante de continuité de Ψ (telle que $|\Psi(x, y)| \leq \|\Psi\| \|x\| \|y\|$, et C un majorant de $\|y_n\|$).

La suite $(y_{j(n)})$ est donc telle que $\Psi(x, y_{j(n)})$ converge, pour tout x , vers un réel noté $h(x)$. Cette limite est de façon linéaire par rapport à x , et de norme majorée par une constante fois la norme de x , il s'agit donc d'une forme linéaire continue sur F . \square

On notera l'importance de la séparabilité de E dans la démonstration ci-dessus. Par ailleurs, le procédé construit une limite qui n'est pas un élément de F , mais une forme linéaire sur E' , qui n'est pas nécessairement dans l'image de T .

La proposition précédente est très générale, et d'ailleurs très vide dans certains cas (prendre par exemple Ψ identiquement nulle, ou bien E de dimension finie alors que F est de dimension infinie). La propriété devient pertinente quand l'espace E et la forme Ψ sont tels que la dualité est *séparante*, c'est à dire (on privilégie ici l'espace E) que

$$\Psi(x, y) = 0 \quad \forall x \implies y = 0.$$

Cette propriété assure l'*injectivité* de l'application T définie ci-dessus.

La richesse de l'espace F peut être formalisée par la condition symétrique de dualité séparante :

$$\Psi(x, y) = 0 \quad \forall y \implies x = 0.$$

6. Il admet une famille dénombrable dense.

Si cette seconde condition est vérifiée, alors l'image de T est dense dans E' pour la topologie faible- \star sur E' (i.e. en dualité avec E'). Dans le cas où E est réflexif, on aura bien densité de $T(F)$ dans E' . On prendra garde au fait que, si E n'est pas réflexif, on peut avoir E et F en dualité séparante sans que $T(F)$ ne soit dense dans E' . Considérer par exemple $E = \ell^\infty$, $F = \ell^1$, et Ψ la dualité canonique entre ces deux espaces. Elle est évidemment (doublement) séparante, mais $T(\ell^1)$ n'est pas dense dans ℓ^∞ : la forme linéaire qui à une suite de ℓ^∞ convergente associe sa limite, prolongée sur ℓ^∞ (par le théorème de Hahn-Banach analytique ??, page ??), est à distance au moins 1 de $T(\ell^1)$.

Corollaire V.4.6. Soit E un e.v.n. séparable. De toute suite bornée dans E' on peut extraire une sous-suite bornée qui converge pour la topologie faible- \star .

On fera bien la distinction entre le corollaire précédent et le théorème de Banach-Alaoglu-Bourbaki, qui établit la compacité de la boule unité de E' pour la topologie faible- \star , sans hypothèse de séparabilité. Dans le cas où E n'est pas séparable, on a bien compacité, mais la topologie n'est *pas métrisable*, de telle sorte que la compacité ne peut pas se traduire en termes de suites extraites convergentes⁷.

Ainsi la boule unité de ℓ^1 est bien compacte pour $\sigma(\ell^\infty, \ell^1)$, mais on ne peut par exemple extraire aucune sous suite convergente (faible- \star) de la suite (e_n) .

Corollaire V.4.7. Soit E un espace de Banach dont le dual est séparable. De toute suite bornée dans E on peut extraire une sous-suite qui converge⁸ dans E'' pour la topologie $\sigma(E', E'')$. Si E est réflexif, la sous-suite converge faiblement dans E .

Dans le cas Hilbertien on peut supprimer la condition de séparabilité.

Corollaire V.4.8. Soit H un espace de Hilbert. De toute suite bornée dans H on peut extraire une sous-suite qui converge faiblement dans H .

Démonstration. Il suffit de se placer dans l'adhérence V de l'espace vectoriel engendré par les termes de la suite, qui est séparable par construction. On vérifie ensuite que l'on a bien convergence faible sur $H = V + V^\perp$ de la suite extraite. \square

Espaces fonctionnels, mesures

On considère Ω un domaine de \mathbb{R}^d (qui peut être l'espace tout entier).

Le corollaire V.4.7 permet d'extraire d'une suite bornée une sous-suite faiblement convergente dès que l'espace considéré est réflexif, donc en particulier dans les espaces $L^p(\Omega)$ pour $1 < p < +\infty$, ainsi que dans les espaces de Sobolev $W^{m,p}(\Omega)$, pour tout $m \in \mathbb{N}$, tout $p \in]1, +\infty[$.

Pour les espaces non réflexifs (comme $L^1(\Omega)$ ou $L^\infty(\Omega)$, ou les espaces de Sobolev associés), la propriété est fautive en général, comme l'illustrent les exemples suivants.

Dans $L^1(\mathbb{R})$: la suite $f_n = \mathbb{1}_{]n, n+1[}$ est sur la sphère unité. Si une sous-suite converge faiblement vers f , alors f s'annule contre toute fonction régulière à support compact, elle est donc nécessairement nulle. Mais par ailleurs $\langle 1, f_n \rangle$ est identiquement égale à 1, on doit donc avoir $\langle 1, f \rangle = 1$, ce qui est impossible.

Dans L^∞ , les choses sont un peu plus délicates, car le dual de cet espace n'est pas clairement identifié⁹. En particulier, le fait que l'on puisse (ou pas) extraire une sous-suite convergente de la

7. Autant dire qu'elle n'est pas commode à *utiliser* dans la vie de tous les jours.

8. Plus précisément son image par la surjection canonique de E dans E'' .

9. Montrer que le dual de L^∞ contient des formes qui ne peuvent pas se représenter par des fonctions de L^1 nécessite l'utilisation du théorème de Hahn-Banach analytique ??, page ??, donc indirectement de l'axiome du choix.

suite définie précédemment n'est pas aisé à trancher. On peut néanmoins construire un contre-exemple analogue, en considérant par exemple la forme linéaire sur $L^\infty(\mathbb{R})$ qui à une fonction convergente en $+\infty$ associe sa limite, prolongée par le théorème de Hahn-banach analytique en $\varphi \in (L^\infty(\Omega))'$. On considère alors la suite $f_n = \mathbb{1}_{]n, +\infty[}$. Si elle converge faiblement vers f , alors nécessairement f est nulle presque partout, donc tend vers 0 en $+\infty$, or on doit avoir $\langle \varphi, f \rangle = 1$, ce qui est absurde.

Convergence faible dans les cas non réflexifs L'espace $L^\infty(\Omega)$ s'identifie au dual de $L^1(\Omega)$, qui est séparable, on peut donc, d'une suite bornée dans L^∞ extraire une sous-suite qui converge (faible- \star) vers une limite de L^∞ .

L'espace $L^1(\Omega)$, dont le dual L^∞ n'est pas séparable, peut être mis en dualité avec des espaces de fonctions continues (munis de la norme ∞) : espace C_c des fonctions continues à support compact, espace C_0 des fonctions qui tendent vers 0 au bord de Ω , et l'espace C_b des fonctions bornées sur Ω . Noter que ces trois espaces s'identifient si l'on se place sur un compact. Dans le cas d'un domaine ouvert considéré ici, les 2 premiers espaces sont séparables, mais le troisième ne l'est pas. D'une suite bornée dans L^1 on pourra donc extraire une sous-suite qui converge vaguement (contre les fonctions de C_c) ou faiblement (contre les fonctions de C_0), mais la limite est définie comme une forme linéaire sur ces espaces, elle ne s'identifie pas forcément à une fonction de L^1 : il s'agit en toute généralité d'une mesure bornée. Par exemple la suite $f_n = n\mathbb{1}_{]0, 1/n[}$ converge faiblement vers la masse de Dirac en 0. En l'occurrence, cette convergence est aussi étroite, mais on prendra garde au fait que l'on ne peut en général, d'une suite bornée de L^1 , extraire une sous-suite qui converge étroitement (du fait de la non séparabilité de $C_b(\Omega)$). Ainsi la suite $f_n = n\mathbb{1}_{]n, n+1/n[}$ converge vaguement ou faiblement vers 0, mais il n'en existe aucune sous-suite qui convergerait étroitement.

Exercice V.4.1. On considère l'espace E des fonctions continues sur \mathbb{R}^d qui convergent vers une valeur finie lorsque $|x|$ tend vers $+\infty$. Montrer qu'il s'agit d'un espace complet (pour la norme ∞) séparable, et énoncer une propriété de compacité séquentielle faible- \star pour $L^1(\mathbb{R}^d)$ mis en dualité avec E . Que peut on dire de la suite $f_n = n\mathbb{1}_{]n, n+1/n[}$ définie précédemment ?

Proposer une généralisation de cette approche à des fonctions pour lesquelles la limite en $+\infty$ dépend de la direction $x/|x|$. (On pourra commencer par le cas $d = 1$, avec simplement 2 limites différentes en $+\infty$ et $-\infty$.)

Chapitre VI

Corrigés des exercices

Sommaire

VI.1 Topologie	155
VI.2 Calcul Différentiel	165
VI.3 Mesure et Intégration	179

VI.1 Topologie

Correction de l'exercice I.2.1 (page 7)

Une matrice est dans \mathcal{D} si et seulement si :

1. ses éléments diagonaux sont nuls, tous les autres étant strictement positifs ;
2. elle est symétrique : $d_{ij} = d_{ji}$ pour tous $i \neq j$;
3. ses coefficients vérifient les inégalités triangulaires : pour tout triangle (i, j, k) dans X^3 , on a

$$d_{ij} \leq d_{ik} + d_{kj}.$$

L'ensemble \mathcal{D} est un cône de sommet 0 : on a $D \in \mathcal{D} \implies \lambda D \in \mathcal{D}$ pour tout $\lambda > 0$, qui ne contient pas son sommet. Ce cône est par ailleurs convexe : pour tous D_0, D_1 dans \mathcal{D} , tout $t \in [0, 1]$, on a

$$(1 - \lambda)D_0 + \lambda D_1 \in \mathcal{D}.$$

Correction de l'exercice I.2.2 (page 7)

On peut considérer par exemple la distance

$$(x, y) \in]-1, 1[^2 \longmapsto d(x, y) = |g(y) - g(x)|, \text{ avec } g(u) = \frac{u}{1 - u^2}.$$

Le caractère strictement croissant de cette fonction assure la séparation, la symétrie est immédiate, et l'inégalité triangulaire résulte de celle de la valeur absolue :

$$|g(u) - g(v)| = |g(u) - g(w) + g(w) - g(v)| \leq |g(u) - g(w)| + |g(w) - g(v)|.$$

Correction de l'exercice I.2.3 (page 8)

Si A est un singleton, ou une collection finie de points, ou un intervalle de type $[a, b]$, la distance est toujours atteinte.

En revanche si l'on prend $A =]0, 1[$, la distance $d(x, A)$ n'est atteinte que pour $x \in A$.

Correction de l'exercice I.2.4 (page 8)

La connaissance de la fonction distance à A dit beaucoup de chose sur A , mais ne suffit pas à le déterminer, comme le suggère l'exercice précédent : les intervalles $[0, 1]$, $[0, 1[$, $]0, 1]$, $]0, 1[$ ont la même "signature" en termes de fonction distance, ils sont pourtant différents. Comme on le verra, la distance permet d'identifier l'*adhérence* de A .

Pour $A = \mathbb{D} \subset X = \mathbb{R}$, la distance à A est identiquement nulle (on peut approcher avec une précision arbitraire un réel par un décimal). De façon plus générale, comme on le verra, la distance est nulle dès que A est *dense* dans X .

Correction de l'exercice I.2.5 (page 9)

On a

$$\|x\| = \|x - y + y\| \leq \|x - y\| + \|y\| \implies \|y\| - \|x\| \leq \|x - y\|.$$

On démontre la même inégalité sur $\|x\| - \|y\|$ en intervertissant les rôles de x et y , d'où l'inégalité sur $|\|y\| - \|x\||$.

Correction de l'exercice I.3.1 (page 10)

On a A_1 fermé, A_2 fermé, A_3 ni fermé ni ouvert, A_4 fermé, A_5 ni fermé ni ouvert, A_6 est ouvert, A_7 est fermé, A_8 ouvert, A_9 ni fermé ni ouvert, A_{10} fermé.

Correction de l'exercice I.2.6 (page 9)

La sphère unité pour la norme infinie est le carré $[-1, 1] \times [-1, 1]$. La sphère unité pour la norme 1 est aussi un carré centré en l'origine, dont l'un des côtés est le segment $[(1, 0), (0, 1)]$ (les autres sont obtenus par rotations d'angles $\pi/2$, π , et $3\pi/2$). Pour $p = 2$, on a le cercle de centre $(0, 0)$ et de rayon 1. Entre 2 et ∞ , la sphère a la forme d'un carré aux coins arrondis, d'autant plus proche du carré (en restant intérieure au carré limite) que p tend vers $+\infty$. On a le même type de convergence, quand p passe de 2 à 1, vers le carré du cas $p = 1$ (par l'extérieur).

Correction de l'exercice I.3.2 (page 10)

L'intersection des intervalles $] -1/n, 1/n[$ est le singleton $\{0\}$, qui n'est pas ouvert car il ne contient aucune boule ouverte de centre 0.

L'union des $[1/n, 1]$ est $]0, 1]$, qui n'est pas fermé.

Correction de l'exercice I.3.3 (page 11)

a) L'intérieur étant un ouvert par définition, un ensemble qui s'identifie à son intérieur est ouvert. Par ailleurs un ouvert se contient, et c'est évidemment le plus grand des ouverts qu'il contient. Le raisonnement est analogue pour les fermés.

b) Un ensemble qui s'identifie à sa frontière est un fermé (il l'est comme adhérence de quelque chose), d'intérieur vide.

Correction de l'exercice I.3.4 (page 11)

a) $\bar{A} = A$, $\overset{\circ}{A} = \emptyset$, $\partial A = A$.

b) $\bar{A} = \overline{B}(0, 1)$, $\overset{\circ}{A} = A$, $\partial A = S(0, 1)$.

c) $\bar{A} = A$, $\overset{\circ}{A} = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2, y > 0\}$, $\partial A = \{(x, 0), x \in \mathbb{R}\}$.

d) $\bar{A} = A \cup \{0\}$, $\overset{\circ}{A} = \emptyset$, $\partial A = \bar{A}$.

e) $\bar{A} = A \cup \{0\} \times [-1, 1]$, $\overset{\circ}{A} = \emptyset$, $\partial A = \bar{A}$.

Correction de l'exercice I.3.5 (page 12)

Toute boule $B(q, \varepsilon)$ contient un non rationnel (par exemple $q + \varepsilon\pi/4$), \mathbb{Q} est donc d'intérieur vide. Comme \mathbb{Q} est dense dans \mathbb{R} , son adhérence est \mathbb{R} tout entier, et sa frontière aussi. Pour un tel ensemble, la frontière est infinie non dénombrable, alors que l'ensemble lui-même est dénombrable.

Correction de l'exercice I.3.6 (page 13)

Le diamètre de $\overline{\mathbb{R}}$ pour cette métrique est π , et on a

$$B(0, \pi/2) =] - \infty, +\infty[, \quad B(1, \pi/2) =] - 1, +\infty[,$$

Correction de l'exercice I.3.7 (page 13)

On peut par exemple remplacer la fonction arctan par $x \mapsto \frac{1}{1+|x|}$.

Correction de l'exercice I.5.1 (page 15)

Soient a_1, a_2, \dots, a_p les valeurs prises par la suite de Cauchy. La quantité $d(a_i, a_j)$ admet un minimum $\varepsilon > 0$ sur l'ensemble des $1 \leq i < j \leq p$. On écrit le critère de Cauchy pour cet ε particulier : il existe N tel que, pour tous p, q plus grand que N , $d(x_p, x_q) < \varepsilon$. Les termes x_p pour $p \geq N$ s'identifient donc forcément à x_N .

Correction de l'exercice I.5.2 (page 15)

C'est une conséquence directe de la définition : pour tout ε , il existe N tel que, pour tous p, q plus grands que N , $d(x_p, x_q) < \varepsilon$, d'où $\text{diam}(X_N) \leq \varepsilon$ (on prendra garde au fait que l'inégalité stricte devient large, mais ça ne remet pas en cause la convergence vers 0).

Correction de l'exercice I.5.3 (page 16)

La suite $x_n = 0.1111\dots 1100$ (décimales égales à 1 jusqu'à la n -ième) est de Cauchy, mais ne converge pas vers un décimal.

Correction de l'exercice I.5.4 (page 16)

- a) On peut considérer par exemple la suite $x_n = \log(n)$.
- b) On considère une suite obtenue en partant de $u_0 = 1$, puis $u_1 = u_0 + 1/2$, $u_2 = u_1 + 1/3$, $u_3 = u_2 + 1/4$, qui dépasse deux, on change alors de direction $u_4 = u_3 - 1/5$, etc., jusqu'à passer en dessous de -3 , puis on repart vers la droite jusqu'à dépasser 4, etc Cette suite balaie des intervalles de plus en plus grands, avec un pas qui tend vers 0, d'où la densité.

Correction de l'exercice I.6.1 (page 16)

- a) \mathbb{R} n'est pas compact car de $\mathbb{R} = \bigcup_{n \in \mathbb{Z}}]n-1, n+1[$ on ne peut extraire aucun recouvrement fini. Pour $]0, 1[$, on peut considérer

$$]0, 1[\subset \bigcup_{n \geq 2} \left] \frac{1}{n+1}, \frac{1}{n-1} \right[.$$

d'où on ne peut extraire aucun recouvrement fini.

- b) Si un ensemble est fini, de cardinal N chaque point est contenu dans l'un des ouverts du recouvrement, on peut donc extraire un recouvrement par N ouverts (voire moins).
- c) Soit x_n décroissante vers 0. On peut recouvrir l'ensemble de ses termes par l'union des $]x_n/2, 2x_n[$, dont on ne peut extraire aucun recouvrement fini. Si l'on rajoute 0, alors pour tout recouvrement par des ouverts il existe un recouvrement qui contient 0. Les termes de la suite qui ne sont pas dans cet ouvert sont en nombre fini, on peut donc extraire un recouvrement fini de ce sous ensemble (voir (b)).

Correction de l'exercice I.6.2 (page 16)

L'application

$$T : x \in \overline{\mathbb{R}} \mapsto T(x) = \arctan(x),$$

(avec la convention $\arctan(\pm\infty) = \pm\pi/2$), est une isométrie entre $[-\pi/2, \pi/2]$ muni de la distance usuelle et \mathbb{R} . Pour toute suite x_n dans $\overline{\mathbb{R}}$, on peut extraire une sous suite telle que $y_{\varphi(n)} = T(x_{\varphi(n)})$ converge vers $y \in [-\pi/2, \pi/2]$, d'où la convergence de $T^{-1}(x_{\varphi(n)})$ vers $T^{-1}(y)$.

Correction de l'exercice I.6.3 (page 18)

Si l'on considère une suite de points dans l'intersection, on peut extraire une suite qui converge dans le premier compact. On extrait ensuite de cette première sous-suite une sous-suite qui converge dans le second.

Correction de l'exercice I.6.4 (page 18)

On considère une suite de points du fermé. Elle est dans le compact, on peut donc extraire une sous-suite qui converge dans le compact. La limite est dans le fermé, puisqu'il est fermé.

Correction de l'exercice I.6.5 (page 19)

On définit P_n le polynôme de degré n donc le k -ième coefficient vaut $\exp(-k)$, pour $0 \leq k \leq n$. La suite ainsi construite est de Cauchy, mais ne converge vers aucun polynôme.

Correction de l'exercice I.7.1 (page 19)

L'application $f : x \mapsto f(x) = \sin(x)$ est continue, mais l'image de l'ouvert \mathbb{R} (ou de l'ouvert $] -\pi, \pi[$ par f , égale à $[-1, +1]$, n'est pas ouverte.

L'application $f : x \mapsto f(x) = e^x$ est continue, mais l'image du fermé \mathbb{R} par f , égale à $]0, +\infty[$, n'est pas fermée.

On notera que cette deuxième application est injective, on pourrait penser que ça “marche dans les deux sens”, mais comme elle n'est pas surjective, sa réciproque doit être vue comme application (le logarithme) de $]0, +\infty[$ dans \mathbb{R} , qui est aussi continue. L'image réciproque du fermé \mathbb{R} est $]0, +\infty[$, qui est bien *fermé* comme espace métrique à part entière (voir remarque I.3.4, page 10).

Correction de l'exercice I.7.2 (page 20)

- a) Tout borné est d'adhérence compacte, d'où f est bornée sur l'adhérence, donc sur le borné.
- b) La fonction $x \mapsto 1/x$ est continue sur le borné $]0, 1[$ de \mathbb{R} , mais non bornée.

Correction de l'exercice II.6.1 (page 59)

La suite (de suites) (u^n) définie par $u_k^n = 1/k$ si $k \leq n$, 0 sinon, est de Cauchy. Si elle convergeait vers (v_k) on aurait nécessairement $v_k = 1/k$ pour tout k , or cette suite n'est pas dans X .

Correction de l'exercice II.6.2 (page 60)

- a) On considère l'ensemble B des suites de 0 ou de 1. Il existe une surjection de B dans $[0, 1]$ (codage dyadique des réels), il est donc non dénombrable. On considère maintenant les boules ouvertes centrées en les points de B , de rayon $1/2$. Ces boules sont disjointes, et, si D est un ensemble dense, alors chaque boule contient au moins un élément de D , donc D n'est pas dénombrable.
- b) Pour c_0 , on considère l'ensemble Q des suites dont les termes sont rationnels, et qui sont nulles au delà d'un certain rang. Cet ensemble est dénombrable et dense dans c_0 .
- c) Le même ensemble Q est dense dans ℓ^p .

Correction de l'exercice I.11.1 (page 26)

- a) Il suffit de considérer la suite des intervalles $]0, 1/n[$.
- b) Comme on le verra, une suite décroissante de compacts a une intersection non vide (exercice I.11.7), il est donc sans espoir de chercher un exemple avec des bornés. On pourra considérer par exemple la suite des intervalles semi-infinis $[n, +\infty[$.

Correction de l'exercice I.11.2 (page 26)

a) La séparation et la symétrie sont immédiates. Si l'on considère maintenant x , y , et z dans H_N . Si aucun des bits qui diffèrent entre x et y ne correspond à l'un de ceux qui diffèrent entre y et z , on a $d(x, z) = d(x, y) + d(y, z)$. Si ces deux ensemble ont un ou des éléments communs, on a $d(x, z) < d(x, y) + d(y, z)$, d'où l'inégalité triangulaire.

Chaque point est seul dans sa boule de rayon $1/2$, il s'agit donc d'un espace discret.

Pour tout $x \in H_N$, le point le plus éloigné est celui obtenu en changeant tous les bits, il est donc à distance N . La diamètre est donc N , et l'on peut dire que tout point est "sur le bord de H_N , au sens où tout point admet un élément diamétralement opposé.

2) On considère le cas $x = (0, 0, \dots, 0)$, la situation étant exactement la même si l'on part d'un autre éléments. Pour $r < 1$, la boule est réduite au centre. Pour $1 \leq r < 2$, on a tous les points qui diffèrent d'un bit, il y en a donc N . Pour $2 \leq r < 3$ on a $C_N^2 = N(N-1)/2$. De façon générale, pour $k \leq r < k+1$, le cardinal est C_N^k , et $C_N^N = 1$ pour $r \geq N$ (la sphère est constituée de l'unique point diamétralement opposé).

Correction de l'exercice I.11.3 (page 26)

1) La distance n'est nulle que si les points sont confondus, par définition. Les rôles joués par x et y dans la définition sont interchangeable, ce qui implique la symétrie. Pour l'inégalité triangulaire, considérons x , y , et z , et k_{xy} le plus petit indice pour lequel les bits de x et y diffèrent. On définit de même k_{xz} et k_{yz} . Les éléments x et y s'identifient sur les $k_{xy} - 1$ premiers bits, y et z sur les $k_{yz} - 1$, d'où x et z s'identifient par transitivité sur les $\min(k_{xy}, k_{yz}) - 1$ premiers bits, d'où l'on déduit, $k_{xz} \geq \min(k_{xy}, k_{yz})$, et l'inégalité triangulaire en appliquant la fonction décroissante $k \mapsto 2^{-k}$.

2) 3) 4) 5) 6)

Correction de l'exercice I.11.4 (page 26)

Le complémentaire de l'adhérence du complémentaire de A est un ouvert comme complémentaire d'un fermé.

Montrons qu'il est contenu dans A : pour tout $x \in (\overline{A^c})^c$, on a $x \notin \overline{A^c}$ d'où $x \notin A^c$, et donc $x \in A$.

Montrons pour finir que tout ouvert contenu dans A est contenu dans $x \in (\overline{A^c})^c$. Soit U un ouvert contenu dans A . Il existe une boule $B(x, \varepsilon) \subset U \subset A$. Le point x n'est donc pas dans l'adhérence du complémentaire de A (aucune suite du complémentaire de A ne peut tendre vers x), il appartient donc à $(\overline{A^c})^c$. Cet ouvert contient donc tous les ouverts contenus dans A , c'est donc le plus grand, à savoir l'intérieur de A .

Correction de l'exercice I.11.5 (page 27)

Tout point \bar{A} est limite d'une suite (x_n) de points de A (proposition I.4.6), on a donc

$$0 \leq d(x, A) \leq d(x, x_n) \rightarrow 0,$$

d'où $d(x, A) = 0$. Réciproquement, si $d(x, A) = 0$, il existe une suite minimisante (x_n) d'éléments de A telle que $d(x, x_n)$ tend vers 0, d'où $d(x, A) = 0$.

Si $x \in \overset{\circ}{A}$, il existe une boule $B(x, \varepsilon) \subset A$, la distance de x à tout point de A est donc supérieure à ε , d'où $d(x, A) \geq \varepsilon > 0$. Inversement, si $d(x, A^c) = \alpha > 0$, alors tous les points y tels que $d(x, y) < \alpha$ sont dans A , i.e. $B(x, \alpha) \subset A$.

Par définition, la frontière est l'ensemble des points de l'adhérence de A (donc tels que $d(x, A) = 0$ d'après ce qui précède), qui ne sont pas dans $\overset{\circ}{A}$ (et donc tels que $d(x, A^c) = 0$).

Correction de l'exercice I.11.6 (page 27)

- a) Il suffit de considérer par exemple le segment $[0, 1[\times \{0\}$. La distance est atteinte pour tout point de $\{(x, y), x < 1\}$, non atteinte pour les autres points.
- b) Il suffit de prendre un ensemble non convexe, par exemple la réunion de deux singletons disjoints. En chaque point de la médiatrice, la distance est atteinte en deux points. On peut aussi avoir une distance atteinte en une infinité de points. Considérer par exemple le cercle unité. La distance est atteinte en un seul point pour tous les x non nuls, mais en tous les points de l'ensemble pour $x = (0, 0)$.
- c)
- d) On considère l'ensemble des stations-relais comme une famille de points du plan. Lorsque l'on passe un appel, le téléphone passe par la borne la plus proche. La zone couverte par une station donnée (en les supposant toutes de même puissance) est donc la *cellule* de Voronoï associée à la position de la station. Le terme de cellule provient du fait que la zone ressemble à une cellule organique (cellules de peau d'oignon par exemple).

Correction de l'exercice I.11.7 (page 27)

Pour tout n on choisit x_n dans K_n . La suite (x_n) est dans K_0 compact, elle admet donc une sous-suite $(x_{\varphi(n)})$ convergente vers $x \in K_0$. Pour tout n , la suite extraite est dans K_n au-delà d'un certain rang. Comme K_n est compact, il est fermé, la limite x est donc dans K_n . L'élément x appartient donc à tous les K_n .

Correction de l'exercice I.11.8 (page 27)

- a) L'application $y \mapsto d(x, y)$ est continue sur le compact K , elle atteint donc ses bornes, en particulier sa borne inférieure.
- b) Si F est un fermé non vide, on choisit arbitrairement $y_0 \in F$. La distance de x à F est par définition inférieure ou égale à $d(x, y_0)$. Elle s'écrit donc comme infimum de $d(x, \cdot)$ sur

$$F \cap \{y, d(x, y) \leq d(x, y_0)\}.$$

Le second ensemble est fermé comme image réciproque du fermé $] - \infty, d(x, y_0)]$ par l'application $d(x, \cdot)$, c'est donc un fermé, et il est borné par définition. L'intersection ci-dessus est donc un fermé comme intersection de fermés, et borné, c'est un compact. La fonction distance atteint donc ses bornes, d'où l'on déduit que l'infimum est atteint.

Correction de l'exercice I.11.9 (page 27)

Correction de l'exercice I.11.10 (page 28)

On s'intéresse à la continuité de l'application

$$x \in X \mapsto d(x, A) = \inf_{a \in A} d(x, a).$$

Pour tout $a \in A$, on a

$$d(x, A) \leq d(x, a) \leq d(x, y) + d(y, a).$$

En appliquant cette inégalité à une suite minimisante pour $d(y, A)$, c'est à dire une suite (a_n) dans A telle que $d(y, A) = \lim d(y, a_n)$, on obtient

$$d(x, A) \leq d(x, y) + d(y, A).$$

On montre en échangeant les rôles de x et y que

$$d(y, A) \leq d(x, y) + d(x, A).$$

On a donc montré

$$\max(d(x, A) - d(y, A), d(y, A) - d(x, A)) = |d(x, A) - d(y, A)| \leq d(x, y),$$

qui exprime le caractère 1-lipchitzien de $d(\cdot, A)$.

Correction de l'exercice I.11.11 (page 28)

On se place dans le cas où le demi-plan ne contient pas l'origine (sinon le minimiseur est 0), le mieux est de tracer la plus grosse "boule" centrée en 0, c'est à dire ici un carré donc les côtés sont orientés à $\pi/4$ et $3\pi/4$, dont l'intersection avec le demi-plan admissible soit d'intérieur vide. On voit que le minimum est en général réalisé par un coin du carré (donc un point sur l'un des axes), sauf si la frontière du demi plan est alignée avec l'un des côtés, auquel cas le minimum n'est pas unique, car réalisé par tous les points de l'un des côtés. Cela illustre l'intérêt de l'utilisation de rajouter cette norme ℓ^1 à certains problèmes de minimisation sous contraintes (approche de type lasso), car ce terme a tendance à diminuer le nombre de coefficients non nuls pour le minimiseurs (approche *parcimonieuse*, voir aussi exercice I.11.12). En dimension 3 le minimiseur est en général l'un des sommets d'un cube, mais cela peut-être aussi dans certains cas particuliers une arête, ou une face.

Correction de l'exercice I.11.12 (page 28)

On peut bien sûr définir la quantité $\sum |x_k|^p$ pour $p < 1$, on garde les propriétés de séparation et de symétrie, mais on perd l'inégalité triangulaire. On pourra par exemple considérer le cas $p = 1/2$, et $x = (1, 0)$, $y = (0, 1)$, on a

$$\|x\|_{1/2} = 1, \|y\|_{1/2} = 1, \|x + y\|_{1/2} = 4 > \|x\|_{1/2} + \|y\|_{1/2}.$$

Lorsque l'on fait tendre p vers 0 dans $\sum |x_k|^p$, chaque terme nul reste nul, et les termes non nuls tendent vers 1, on converge donc vers un entier positif qui est le nombre de termes non nuls parmi les composantes de x . Bien que cela sorte du cadre de la norme, il s'agit d'une quantité (on parle de *norme 0*), qui peut être très intéressante à utiliser dans un contexte d'optimisation. Si l'on cherche à minimiser une fonctionnelle par rapport à un vecteur x de \mathbb{R} , rajouter à la fonctionnelle un terme proportionnelle à $\|x\|_0$ aura tendance à minimiser cette quantité, et donc à limiter le nombre de termes non nul dans le minimum trouvé, ce qui peut être très intéressant si le problème d'optimisation consistant par exemple à approcher une fonction par une combinaison de fonctions particulières, dont les coefficients sont les x_i . On parle d'approximation *parcimonieuse* quand on cherche de la sorte à approcher quelque chose par une combinaison de constituants élémentaires de façon en quelque sorte économique (l'approximant sera en particulier plus léger à stocker sur un ordinateur).

Correction de l'exercice I.11.13 (page 28)

a) On a, pour tout $x \in \mathbb{R}^d$,

$$\|x\|_\infty \leq \|x\|_p \leq n^{1/p} \|x\|_\infty.$$

On réalise l'égalité à droite pour $x = (1, 1, \dots, 1)$, et l'égalité à gauche pour $x = (1, 0, \dots, 0)$.

b) La constante de l'inégalité de droite tend vers $+\infty$ quand n tend vers $+\infty$, ce qui suggère que les normes ne sont pas équivalentes en dimension infinies.

Correction de l'exercice I.11.14 (page 28)

a) On a

$$m_p = \frac{1}{n^{1/p}} \|x\|_p = \frac{1}{n^{1/p}} \left(\sum x_k^p \right)^{1/p} \leq \frac{1}{n^{1/p}} (n \max(x_k)^p)^{1/p} = \max(x_k),$$

et de la même manière $m_p \geq \min(x_k)$. Il s'agit bien d'un nombre compris entre la valeur min et la valeur max.

On a par ailleurs, d'après l'inégalité de Hölder (proposition IV.1.31, page 132),

$$\sum_{k=1}^n |x_k y_k| \leq \left(\sum_{k=1}^n \theta_i |x_k|^p \right)^{1/p} \left(\sum_{k=1}^n \theta_i |y_k|^q \right)^{1/q},$$

avec $1/p + 1/q = 1$. En appliquant cette inégalité à (x_k) et le vecteur constant égal à 1, on obtient

$$m_1 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |x_k y_k| \leq \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n \theta_i |x_k|^p \right)^{1/p} n^{1/q},$$

d'où

$$n^{1/q-1} \left(\sum_{k=1}^n \theta_i |x_k|^p \right)^{1/p} \geq m_1.$$

Comme $1/q - 1 = -1/p$, on en déduit $m_p \geq m_1$. Chaque élève voit donc sa moyenne augmenter par rapport au calcul classique.

b) Le fait d'utiliser une somme des notes à la puissance $p > 1$ renforce l'importance des notes élevées, d'autant plus que p est grand. La moyenne 1 habituellement utilisée favorise les élèves qui ne sacrifient aucune épreuves, alors qu'un p grand favorisera les profil plus spécialisés, qui brillent à certaines épreuves quitte à en sacrifier d'autres. Dans le cas extrême $p = +\infty$, on ne garde que la meilleure note. Dans le cas $n = 10$, un élève ayant 20 à une épreuve, 0 aux autres, aura une moyenne m_1 de 2, et une moyenne m_∞ de 20, alors qu'un élève ayant 10 à toutes les épreuves aura une moyenne m_1 de 10 (donc largement au-dessus du premier), et une moyenne m_∞ de 10 (très en-dessous du premier).

Correction de l'exercice I.11.15 (page 29)

Soit $\varepsilon > 0$. Par continuité de f , pour tout $x \in K$, il existe $\eta_x > 0$ tel que, pour tout y à distance de x strictement inférieure à η_x ,

$$|f(y) - f(x)| < \varepsilon.$$

Le compact K est recouvert par l'union des boules $B(x, \eta_x/2)$, on peut donc en extraire un recouvrement fini

$$K \subset \bigcup_{k=1}^n B(x_i, \eta_i/2)$$

(en notant $\eta_i = \eta_{x_i}$). Soit maintenant x et y tels que $d(x, y) < \eta = \min(\eta_i/2)$. Le point x est dans l'une des boules $B(x_i, \eta_i/2)$, et y aussi par hypothèse, on a donc

$$|f(y) - f(x)| \leq |f(y) - f(x_i)| + |f(x_i) - f(x)| < 2\varepsilon.$$

Correction de l'exercice I.11.16 (page 29)

a) Soit K compact. En premier lieu, f étant continue, l'image réciproque de tout fermé est fermée (proposition I.7.2, page 19), l'image réciproque du fermé K est donc fermée. Si elle n'était pas bornée, on pourrait construire une suite (x_n) de points de $f^{-1}(K)$ non bornée, dont l'image serait non bornée par hypothèse, ce qui est absurde. L'image réciproque de K est donc compacte comme fermé borné de \mathbb{R}^n .

b) Soit (x_n) une suite de \mathbb{R}^n telle que $\|x\|$ tend vers $+\infty$. Si la suite des images est bornée, alors on peut l'inclure dans un intervalle fermé (donc compact comme fermé borné), dont l'image réciproque est compacte donc bornée, alors qu'elle est censée contenir tous les x_n , ce qui est absurde.

c) On sait que $|f(x)|$ tend vers $+\infty$ quand $\|x\|$ tend vers $+\infty$. Il existe donc en particulier un $R > 0$ tel que, pour tout x de norme plus grande que R , $|f(x)| \geq 1$. Si f prend des valeurs à la fois positives et négatives à l'extérieur de B_R , on peut trouver deux points x et x' de norme plus grande que R tels que, par exemple, $f(x) > 0$ et $f(x') < 0$. On relie alors les deux points par un chemin continu qui évite la boule (si le segment ne convient pas, on *fait le tour*). La restriction de f à cette ligne est continue, donc prend la valeur 0 en un certain point (d'après le théorème des valeurs intermédiaires), ce qui est absurde puisque l'on doit avoir $\|f(x)\| \geq 1$ en tout point de la ligne.

La dimension 1 est d'une certaine manière pathologique, car on ne peut pas *faire le tour* de 0 pour passer d'un nombre négatif à un nombre positif. De fait, la conclusion est invalidée : l'application identité vérifie bien l'hypothèse que l'image réciproque de tout compact est compacte, et pourtant la fonction tend bien vers $+\infty$ ou $-\infty$ selon la direction que l'on prend.

d) Soit f une fonction coercive au sens du (a). Soit $x \in \mathbb{R}^n$ (par exemple 0). Par hypothèse, $f(x) > f(0)$ pour $\|x\| \geq C$. L'infimum $m \in [-\infty, +\infty[$ de f sur \mathbb{R}^n est donc l'infimum de f sur $\overline{B}(0, C)$. Comme f est continue sur le compact $\overline{B}(0, C)$, elle est bornée et atteint ses bornes, on a donc en particulier $m > -\infty$, et cet infimum est atteint.

Correction de l'exercice I.11.17 (page 29)

L'application $x \mapsto f(x) = 1 - e^{-x}$ sur \mathbb{R}_+ est de dérivée positive, strictement inférieure à 1 sur $]0, +\infty[$. Pour tous $x \neq y$ dans \mathbb{R}_+ , il existe c entre x et y tel que, d'après le théorème des accroissements finis, on ait

$$|f(x) - f(y)| = f'(c) |x - y| < |x - y|.$$

On a aussi

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(h) - f(0)}{h} = f'(0) = 1,$$

il ne peut donc exister aucun $\kappa \in [0, 1[$ tel que f soit κ -contractante.

Correction de l'exercice I.11.18 (page 29)

L'application T^p étant contractante, elle admet un point fixe x unique : $T^p x = x$. On a donc, en composant cette identité par p , $T^p(T(x)) = T(x)$, d'où l'on tire que $T(x)$ est aussi point fixe de T^p . On a donc $T(x) = x$ par unicité du point fixe de T^p . Tout point fixe de T étant aussi point fixe de T^p , on en déduit l'unicité.

Correction de l'exercice I.11.19 (page 29)

a) Pour tout $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$, on a

$$\|Ax\|^2 = \sum a_i^2 x_i^2 \leq \max(|a_i|^2) \sum x_i^2.$$

Si l'on considère maintenant le j qui réalise le max des $|a_i|$, et que l'on prend $x_j = 1$, et $x_i = 0$ pour $i \neq j$, le vecteur ainsi défini réalise l'égalité. On a donc $\|A\| = \max(|a_i|)$.

b) Toute matrice symétrique est diagonalisable dans une base orthonormée (v_i) . Tout vecteur x de \mathbb{R}^n peut s'écrire

$$x = \sum x_i v_i \implies Ax = \sum x_i \lambda_i v_i,$$

et donc

$$\|Ax\|^2 = \sum |x_i|^2 |\lambda_i|^2 \leq \max(|\lambda_i|^2) \sum |x_i|^2 = \max(|\lambda_i|^2) \|x\|^2,$$

et, comme précédemment, le vecteur $x = v_j$ (où j réalise le max des $|\lambda_i|$) réalise l'égalité. La norme d'opérateur de A est donc le max des valeurs absolues des valeurs propres de A .

Correction de l'exercice I.11.20 (page 29)

On considère une suite $(x^k)_k = ((x_n^k)_n)_k$. Pour tout n , la suite $(x_n^k)_k$ est de Cauchy dans \mathbb{R} complet, elle converge donc vers un x_n . Comme (x_k) est bornée dans ℓ^∞ , la suite réelle x_n est bornée, on a donc $x = (x_n) \in \ell^\infty$. La suite (x_k) étant de Cauchy, on a

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists N, \forall p, q \geq N, \|x^p - x^q\| < \varepsilon,$$

c'est à dire

$$\|x_n^p - x_n^q\| < \varepsilon \quad n.$$

On fait tendre q vers l'infini, on a donc

$$\|x_n^p - x_n\| \leq \varepsilon \quad n$$

d'où $\|x^p - x\| \leq \varepsilon$. On a donc convergence de (x^k) vers x pour la norme $\|\cdot\|_\infty$.

On note $e_n = (0, 0, \dots, 0, 1, 0, \dots)$. La suite des e_n est telle que deux termes de la suite sont à distance toujours égale à 2, on ne peut donc en extraire aucun sous-suite qui serait de Cauchy, donc aucune sous-suite convergente.

VI.2 Calcul Différentiel**Correction de l'exercice II.1.1 (page 33)**

Toutes les composantes sont polynomiales, donc dérivables sur \mathbb{R} , et la matrice jacobienne de f s'écrit

$$J_f = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 & 0 \\ x_2^2 x_3^4 & 2x_1 x_2 x_3^4 & 4x_1 x_2^2 x_3^3 & 0 \end{pmatrix}.$$

La dernière colonne est nulle car rien ne dépend de x_4 .

Correction de l'exercice II.1.2 (page 34)

a) On a

$$f(x+h) = (x_1+h_1)(x_2+h_2)^2(x_3+h_3)^3 = \\ x_1x_2^2x_3^3 + x_2^2x_3^3h_1 + 2x_1x_2x_3^3h_2 + 3x_1x_2^2x_3^2h_3 + \mathcal{O}(\|h\|^2).$$

En effet, les termes qui restent sont tous au moins d'ordre total 2 vis-à-vis des h_i . L'application est donc différentiable en tout point, et sa différentielle est le terme d'ordre 1 :

$$df(x) \cdot h = x_2^2x_3^3h_1 + 2x_1x_2x_3^3h_2 + 3x_1x_2^2x_3^2h_3.$$

b) On a

$$\|x+h\| = \left(\|x+h\|^2\right)^{1/2} = \left(\|x\|^2 + 2\langle x|h\rangle + o(h)\right)^{1/2}.$$

Pour $x \neq 0$, on peut écrire

$$\|x+h\| = \|x\| \left(1 + 2\frac{\langle x|h\rangle}{\|x\|^2} + o(h)\right)^{1/2} = \|x\| \left(1 + \frac{\langle x|h\rangle}{\|x\|^2} + o(h)\right) = f(x) + \frac{\langle x|h\rangle}{\|x\|} + o(h).$$

L'application est donc différentiable, avec

$$df(x) \cdot h = \left\langle \frac{x}{\|x\|} | h \right\rangle$$

Correction de l'exercice II.1.3 (page 35)

La fonction est identiquement nulle sur les axes de coordonnées, elle admet donc des dérivées partielles nulles sur ces axes, et en particulier en 0. La fonction n'est par contre pas continue en 0. On a par exemple

$$\lim_{t \rightarrow 0} f(t, t) = \frac{1}{2}$$

qui n'est pas la valeur en 0. La fonction n'est donc *a fortiori* pas différentiable en 0.

Correction de l'exercice II.1.4 (page 35)

Lorsque l'application est affine, on a directement le développement limité

$$f(x+h) = f(x) + A \cdot h.$$

La différentielle est donc l'application qui à h associe A , qui se représente donc matriciellement par la matrice A .

Correction de l'exercice II.1.5 (page 35)a) On a (avec $x = (x_1, x_2)$, $h = h_1, h_2$)

$$F(x+h) = F(x_1+h_1, x_2+h_2) = f(x_1+h_1, x_2+h_2)g(x_1+h_1, x_2+h_2) \\ = (f(x) + df(x) \cdot h + o(h))(g(x) + dg(x) \cdot h + o(h)) = f(x)g(x) + \underbrace{(g(x)df(x) + f(x)dg(x))}_{dF(x)} \cdot h + o(h).$$

b) On a maintenant (avec $x_{ij} = (x_i, x_j)$, $h_{ij} = (h_i, h_j)$)

$$\begin{aligned} G(x+h) &= f(x_{12}+h_{12})g(x_{34}+h_{34}) \\ &= (f(x_{12})+df(x_{12})\cdot h_{12}+o(h_{12}))(g(x_{34})+dg(x_{34})\cdot h_{34}+o(h_{34})) \\ &= \underbrace{f(x_{12})g(x_{34})}_{G(x)} + \underbrace{(g(x_{34})df(x_{12})\cdot h_{12}+f(x_{12})dg(x_{34})\cdot h_{34})}_{dG(x)\cdot h} + o(h). \end{aligned}$$

La matrice Jacobienne s'écrit par bloc de la façon suivante

$$J_G = \begin{pmatrix} g(x_{34})J_f(x_{12}) & 0 \\ 0 & f(x_{12})J_g(x_{34}) \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{2,4}(\mathbb{R}),$$

où J_f et J_g sont des matrices-lignes (à deux éléments).

Correction de l'exercice II.1.6 (page 37)

a) On a

$$dF(x) = df(b+Ax) \circ A,$$

et $J_F(x) = J_f A$ (produit matrice-vecteur).

b) On a

$$\begin{aligned} J_F(x, y) &= f'(x^2 + y^2)(2x \ 2y). \\ F(x+h_x, y+h_y) &= F(x, y) + f'(x^2 + y^2)(2xh_x + 2yh_y) + o(h). \end{aligned}$$

Correction de l'exercice II.1.7 (page 38)

a) Le gradient est tel que, pour tout h ,

$$\langle \nabla F(x) | h \rangle = dF(x) \cdot h = df(b+Ax) \cdot Ah = \langle \nabla f(b+Ax) | Ah \rangle = \langle A^T \nabla f(b+Ax) | h \rangle,$$

d'où

$$\nabla F(x) = A^T \nabla f(b+Ax).$$

b) On a ici

$$\langle \nabla F(x | y), h \rangle = dF(x) \cdot h = f'(x^2 + y^2)(2xh_x + 2yh_y)$$

d'où

$$\nabla F = f'(x^2 + y^2) \begin{pmatrix} 2x \\ 2y \end{pmatrix}.$$

Correction de l'exercice II.1.8 (page 38)

On a, pour $h \in \mathbb{R}^{3N}$,

$$E(u+h) = E(u) + \sum_{n=1}^N m_n \langle u_n | h_n \rangle + o(h),$$

d'où l'on déduit que E est différentiable, la différentielle étant l'application qui à h associe le deuxième terme du membre de droite ci-dessus. Ce terme s'écrit $\langle p | h \rangle$, avec

$$p = (p_1, \dots, p_N) \in \mathbb{R}^{3N}, \quad p_n = m_n u_n.$$

Le gradient de l'énergie cinétique par rapport aux vitesses est $\nabla E = p$, qui est la quantité de mouvement. Si l'on choisit de munir l'espace en vitesse du produit scalaire pondéré par les masses, le gradient est le vecteur vitesse $u \in \mathbb{R}^{3N}$.

Correction de l'exercice II.1.9 (page 39)

Ce terme vient du fait que la solution du système différentiel canoniquement associé à la fonction, appelé *flot de gradient*, et qui s'écrit $\dot{x} = -\nabla f(x)$, admet comme solution particulière $x \equiv x_s$ pour tout x_s qui annule le gradient. On parle aussi de *point d'équilibre* dans le contexte des systèmes dynamiques.

Correction de l'exercice II.1.10 (page 40)

On a

$$df = 2x dx + 2y dy + 2z dz - 2c^2 dt,$$

que l'on peut aussi représenter matriciellement par $(2x \ 2y \ 2z \ -2c^2 t)$.

Correction de l'exercice II.1.11 (page 42)

Cette inégalité peut être étendue immédiatement à d'autres normes sur \mathbb{R}^n et \mathbb{R}^m , non nécessairement construites sur le même principe, sous réserve de munir l'espace des applications linéaires entre ces deux espaces de la norme subordonnée adaptée (pour le terme $\|df(x+th)\|$ dans l'inégalité des accroissements finis).

Correction de l'exercice II.1.12 (page 42)

On applique le théorème II.1.19 (des accroissements finis), et l'on utilise le fait que la différentielle est bornée comme fonction continue sur un compact (proposition I.7.4, page 20).

Correction de l'exercice II.2.1 (page 42)

a) On a

$$\max(x_1 + h_1, x_2 + h_2) \leq \max(x_1, x_2) + \max(|h_1|, |h_2|)$$

et

$$\max(x_1 + h_1, x_2 + h_2) \geq \max(x_1, x_2) - \max(|h_1|, |h_2|),$$

d'où

$$|\max(x_1 + h_1, x_2 + h_2) - \max(x_1, x_2)| \leq \max(|h_1|, |h_2|) \leq \|h\|_2,$$

d'où la continuité de f .

b) Pour $a = (x_1, x_2)$ tel que $x_1 < x_2$, cette inégalité stricte reste vérifiée dans un voisinage de x , la fonction f s'identifie donc dans ce voisinage à $x \mapsto x_2$, qui est différentiable, de différentielle dx_2 . Son gradient est le vecteur $(0, 1)$. De la même manière au voisinage d'un point tel que $x_2 < x_1$, le gradient est $(1, 0)$.

c) En un point du type (x, x) , pour tout $h > 0$, on a

$$f((x + h, x) = f(x) + h,$$

et

$$f((x - h, x) = f(x).$$

Il n'existe donc pas de développement limité à l'ordre 1 de f en tout point du type (x, x) .

Correction de l'exercice II.2.2 (page 43)

on a

$$f(x+h) = f(x) + \frac{1}{2} (\langle Ax|h \rangle + \langle Ah|x \rangle) - \langle b|h \rangle + o(h) = f(x) + \frac{1}{2} (\langle (A+A^T)x-b|h \rangle) + o(h),$$

d'où l'on déduit que f est différentiable, de différentielle

$$h \mapsto \frac{1}{2} (\langle (A+A^T)x-b|h \rangle),$$

et donc de gradient

$$\nabla f = \frac{1}{2}(A+A^T)x-b,$$

b) Le gradient devient $Ax-b$ pour une matrice symétrique.

c) Un point est critique pour f si et seulement s'il est solution du système linéaire $Ax=b$ (pour le cas symétrique). Cette propriété est utilisée pour approcher la solution de systèmes linéaires associés à des matrices symétriques définies positives. Pour résoudre le système on cherche un minimiseur de la fonctionnelle quadratique f .

Correction de l'exercice II.2.3 (page 43)

a) On développe comme dans l'exercice précédent, pour obtenir (on prend $a=0$ pour alléger l'écriture)

$$f(x+h) = f(x) + \exp\left(-\frac{1}{2}\langle A \cdot x|x \rangle\right) \langle Ax|h \rangle + o(h),$$

d'où

$$\nabla f = \exp\left(-\frac{1}{2}\langle A \cdot x|x \rangle\right) Ax.$$

b) Le seul point critique / stationnaire de f est donc 0 (ou plus généralement a si $a \neq 0$).

Correction de l'exercice II.2.4 (page 43)

a) Pour un singleton $a \in \mathbb{R}^2$ la fonction est continûment différentiable sur l'ouvert $\mathbb{R}^2 \setminus \{a\}$.

Pour une paire de points, la fonction distance n'est pas différentiable sur la médiatrice, continûment différentiable sur son complémentaire.

Pour un cercle C de centre c , la fonction distance est différentiable sur l'ouvert $\mathbb{R}^2 \setminus (\{c\} \cup C)$.

Pour un disque, la fonction est différentiable sur le complémentaire du disque fermé, différentiable à l'intérieur du disque (car constante égale à 0), non différentiable sur le cercle frontière.

Pour un rectangle la fonction est continûment différentiable sur l'extérieur du rectangle, non différentiable sur la frontière, et différentiable à l'intérieur en dehors du "squelette" du rectangle : bissectrices des angles jusqu'à leur point de croisement, et segment reliant les deux points de croisement (en forme d'enveloppe postale).

b) L'ensemble des points de non différentiabilité est l'ensemble des points qui sont situés à équidistance de 2 centre urbains. Il s'agit de points qui ont une distance importante à la réunion des centres par rapport à la moyenne, on trouvera en particulier parmi ces points le point le plus "isolé" (le point le plus éloigné de toute ville). Il s'agit aussi de points pour lesquels on aura typiquement le choix entre deux hopitaux de centre ville, plus généralement pour tout service restreints aux grandes agglomérations.

Correction de l'exercice II.2.5 (page 43)

a) La plupart des points critiques visibles correspondent à des maxima locaux (sommets ou pointes locales). La plupart des minima locaux semblent “cachés” par les zones bleues représentant des lacs. On peut aussi identifier quelques points-cols (minimum dans une direction, maximum dans une autre), en particulier si l'on trace le chemin que l'on emprunterait pour relier deux maxima locaux en se descendant le moins possible possible (comme dans la zone en bas à gauche de l'image, au nord-est de l'indication ‘...morens’), on passe par un minimum local qui est un point col.

Les minima locaux, maxima locaux, et points-cols peuvent être approché par des fonctions de types respectifs

$$f(x, y) = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}, \quad f(x, y) = -\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}, \quad f(x, y) = \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2},$$

respectivement.

b) Pour qu'il y ait un lac il faut qu'il y ait un minimum local de l'altitude. Le contour du lac correspond à une isovaleur de l'altitude, qui doit être une courbe fermée (qui boucle sur elle-même) associée à une valeur supérieure au minimum, qui délimite une zone qui contient ce minimum. Pour un lac sans île, les valeurs d'altitude prises dans la zone sont inférieures à la valeur du contour.

c) Pour chaque point x_0 de la zone, on peut considérer l'équation différentielle (appelée flot de gradient) $dx/dt = -\nabla f$, qui suit la trajectoire selon la ligne de plus grande pente. Les x_0 tels que cette trajectoire arrive à un lac constituent le bassin d'attraction de ce lac. En tout généralité, ce bassin peut prendre des formes complexes, qui peuvent en particulier contenir des “trous”, on pourrait par exemple imaginer une petite colline entourée d'un lac (que l'on peut voir comme une île sur ce lac), qui contiendrait elle-même un petit lac sur-élevé par rapport au lac périphérique. Il n'y en a pas sur la carte proposée, mais on trouve ce type de bizarrerie en Finlande par exemple (on trouve même une île sur un lac qui contient elle-même un lac, qui contient lui-même une île).

d) Le nombre de lac peut varier en fonction de la pluviométrie. Le nombre maximal de lacs possibles est le nombre de minima locaux, au voisinage desquels émerge un lac en cas de première pluie sur un paysage sec. Mais le nombre de lac peut diminuer alors que leur taille augmente. Le grand lac allongé *estany de Landòs*, sur la carte, est par exemple susceptible de contenir plusieurs minima locaux, qui constitueront autant de lacs en cas de sécheresse.

Correction de l'exercice II.2.6 (page 44)

a) On peut écrire

$$u(x+h) = u(x) + du(x) \cdot h + o(h) = u(x) + J(x) \cdot h + o(h) = u(x) + \frac{1}{2}(J - J^T) \cdot h + \frac{1}{2}(J + J^T) \cdot h + o(h).$$

La matrice antisymétrique $J - J^T$ peut s'écrire

$$J - J^T = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \omega = \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{pmatrix}$$

de telle sorte que le produit matrice-vecteur $J \cdot u$ corresponde au produit vectoriel $\omega \wedge u$. Les ω_i dépendent des dérivées partielles des composantes de u , on a par exemple

$$\omega_2 = \partial_3 u_1 - \partial_1 u_3.$$

La matrice $D = (J + J^T)/2$ est symétrique par construction.

b) La matrice $J = J(x)$ étant symétrique, elle est diagonalisable dans une base orthonormée. Si l'on se place dans cette base (e_1, e_2, e_3) , la matrice s'écrit $D = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$. Considérons le développement

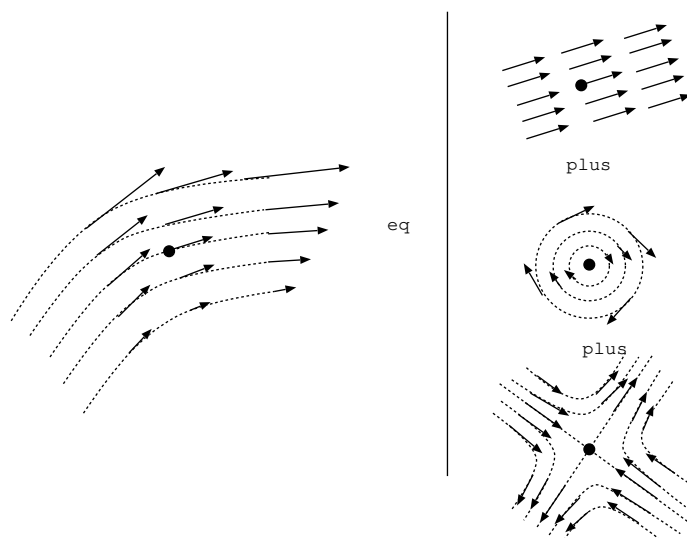


FIGURE VI.2.1 – Décomposition locale d'un champ de vitesse

limité ci-dessus pour $y = x + he_1$. Le premier terme signifie que la vitesse en y est à l'ordre 0 la même que celle en x . Le second terme indique une rotation instantanée de y autour de x , donc sans changement de la distance de x à y . Le troisième terme s'écrit $hD \cdot e_1 = \lambda_1 h e_1$. Si par exemple $\lambda_1 > 0$, cela signifie que le point matériel situé à l'instant considéré en y s'éloigne de x dans la direction e_1 . Il s'agit donc du terme qui modifie les distances entre les points, ce qui correspond à une déformation du milieu fluide, les deux premiers termes encodant un *mouvement rigide* instantané.

La figure VI.2.1 illustre en dimension 2 la décomposition local du champ de vitesse en ces trois composantes : translation, rotation, et déformation

c) Si la divergence $\partial_1 u_1 + \partial_2 u_2 + \partial_3 u_3$ est nulle au point considéré, cela implique que la trace de la matrice D est nulle, donc que la somme des valeurs propres est nulle. Si elles sont toutes nulles, le mouvement instantané est rigide. Si ça n'est pas le cas, elle ne peuvent pas être toutes de même signe, il y en a donc au moins > 0 (étirement dans la direction correspondante), et au moins une < 0 (compression dans cette direction).

d) On peut par exemple considérer un mouvement (rigide) de rotation autour de l'axe vertical, caractérisé par le champ de vitesses

$$u = (u_1, u_2, u_3) = (-x_2, x_1, 0),$$

pour lequel on peut vérifier que la matrice D des taux de déformation est nulle.

e) Le champ suivant peut être vu comme la rencontre de deux masses de fluides qui "se rencontrent" sur le plan $x_1 = 0$ (on pourra faire un dessin dans le plan (x_1, x_2))

$$u = (u_1, u_2, u_3) = (x_1, -x_2, 0).$$

f) Si le champ dérive d'un potentiel, $u = -\nabla\Phi$ avec Φ régulier, alors les composantes du vecteur ω associé, qui sont du type $\partial_i u_j - \partial_j u_i$, sont toutes nulles.

Correction de l'exercice II.2.7 (page 45)

a) La fonction D est régulière comme composée de fonctions régulières, en dehors des points qui annulent la norme, c'est-à-dire le complémentaire de la diagonale. Pour calculer son gradient, on

considère $D(q_1, q_2)$ comme fonction de q_1 seulement. Si l'on se déplace de ε petit de 1 vers 2, la distance diminue de ε :

$$D(q_1 + he_{12}, q_2) = D(q_1, q_2) - h,$$

pour h petit. Si l'on perturbe q_1 selon une direction orthogonale à e_{12} , la variation de la distance est d'ordre 2, la dérivée partielle est donc nulle. En procédant de même pour q_2 (en prenant garde au fait que si l'on se déplace de ε dans la direction e_{12} , la distance *augmente* de ε), on obtient

$$\nabla_{q_1} = -e_{12}, \quad \nabla_{q_2} = e_{12}.$$

b) Le potentiel est différentiable sur U comme composé de fonctions différentiables, et l'on a

$$\nabla_{q_1} V(q) = \varphi'(D) \nabla_{q_1} D = -\varphi'(D) e_{12},$$

et l'opposé pour $\nabla_{q_2} V(q)$.

c) Dans le cas du potentiel d'interaction gravitationnel, on obtient

$$\nabla_{q_1} V(q) = -\varphi'(D) e_{12} = -\frac{1}{D^2} e_{12},$$

et l'opposé pour ∇_{q_2} . On retrouve bien le fait que, pour la force gravitationnelle qui dérive de ce potentiel (c'est à dire que la force est l'opposé du gradient du potentiel), on a une force d'attraction mutuelle proportionnelle à l'inverse du carré de la distance.

d) L'équation s'écrit, pour chaque particule i ,

$$\frac{d^2 q_i}{dt^2} = -\nabla_{q_i} V(q) = \sum_{j \neq i} \varphi'(D(q_i, q_j)) e_{ij}$$

e) On a

$$\frac{dE}{dt} = \sum_{i=1}^N \left\langle \frac{dq_i}{dt} \mid \frac{d^2 q_i}{dt^2} \right\rangle + \left\langle \nabla V \mid \frac{dq}{dt} \right\rangle,$$

qui s'annule du fait que $d^2 q/dt^2 = -\nabla V$.

Dans le cas du potentiel gravitationnel, qui n'est pas borné inférieurement, cela n'implique aucunement que la vitesse soit bornée¹. En revanche si le potentiel est minoré, comme pour le potentiel électrostatique entre deux charges identiques, la conservation de l'énergie assure que l'énergie cinétique, et donc la norme de la vitesse, sont majorées. Noter aussi symétriquement que, l'énergie cinétique étant positive, la conservation de l'énergie assure que l'énergie potentielle est majorée, et qu'ainsi les masses ne peuvent pas se rapprocher en-dessous d'un certain seuil².

Correction de l'exercice II.4.1 (page 52)

L'ensemble F est fermé comme image réciproque du fermé $\{0\}$ par une application continue (car différentiable). Si l'on peut appliquer le TFI en un point (x_0, y_0) , alors il existe un voisinage ouvert W de (x_0, y_0) tel que $\partial_y f$ est inversible sur W . On peut donc appliquer le TFI au voisinage de tout $(x, y) \in F \cap W$.

1. Si la lune cessait brusquement de tourner autour de la terre, elle *tomberait* vers la terre avec une vitesse d'impact telle que l'énergie cinétique de la lune correspondrait à la variation d'énergie potentielle entre la position initiale et la configuration de contact.

2. Cette propriété permet de montrer l'existence d'une solution globale au système dynamique, qui est cantonnée à rester à une certaine distance des points de non-différentiabilité du second membre.

Correction de l'exercice II.4.2 (page 52)

- a) L'ensemble des zéros de f est le cercle de centre $(0,0)$ et de rayon r . On peut appliquer le TFI (exprimer y fonction de x) en dehors des points situés à l'est et à l'ouest $((r,0)$ et $(-r,0))$. En ces points, on peut appliquer le théorème dans l'autre sens, i.e. exprimer x fonction de y .
- b) L'ensemble F est une parabole d'axe l'axe des y . On peut appliquer le TFI au voisinage de tout point. Pour exprimer localement x fonction de y , il faut exclure l'origine.
- c) l'ensemble F est l'union de la courbe $y = x^3$ et de l'axe des x . On peut appliquer le TFI au voisinage de tout point de F en dehors de l'origine.

Correction de l'exercice II.4.3 (page 52)

- a) L'application T est bien une bijection entre U et V , continue, et de jacobienne

$$J = \begin{pmatrix} \cos \theta & -r \sin \theta \\ \sin \theta & r \cos \theta \end{pmatrix}$$

de déterminant $\Delta = r(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) = r > 0$ sur V . Il s'agit donc d'un C^1 difféomorphisme global entre U et V .

- b) On a (on assimile les différentielles df et dg à leurs matrices lignes associées)

$$dg(r, \theta) = df(r \cos \theta, r \sin \theta) \circ J,$$

et

$$df(x, y) = dg(r, \theta) \circ J^{-1},$$

avec

$$J = \frac{1}{r} \begin{pmatrix} r \cos \theta & r \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}.$$

Correction de l'exercice II.4.4 (page 52)

La jacobienne de l'application φ est

$$J = \frac{1}{r} \begin{pmatrix} 2x & -2y \\ 2y & 2x \end{pmatrix},$$

de déterminant $4(x^2 + y^2)$, donc inversible sur U . On a $\varphi(-x, -y) = \varphi(x, y)$, elle n'est donc pas injective, il ne s'agit donc pas d'une bijection de U vers $\varphi(U)$.

Correction de l'exercice II.4.5 (page 53)

On définit la fonction f de la façon suivante

$$(c, z) \in \mathbb{R}^{N+1} \times \mathbb{R} \longmapsto f(c, z) = P_c(z) \in \mathbb{R}.$$

L'équation

$$f(c, z) = 0$$

exprime que $z \in \mathbb{R}$ est racine du polynôme P_c

On se propose d'appliquer le théorème des fonctions implicites à cette fonction, en vue d'exprimer z en fonction de x . En premier lieu on a bien $f(\tilde{c}, \tilde{z}) = 0$. La différentielle partielle $\partial_z f$ est obtenue en faisant un développement limité

$$\begin{aligned} f(c, z+h) = P_c(z+h) &= \sum_{n=0}^N c_n(z+h)^n \\ &= \sum_{n=0}^N c_n(z)^n + \sum_{n=1}^N c_n(z)^{n-1}h + o(h) \\ &= f(c, z+h) + P'(z)h + o(h). \end{aligned}$$

La dérivée partielle de f par rapport à z est donc $P'(z)$. Or $P'(\tilde{z}) \neq 0$ du fait que \tilde{z} est racine simple, et $P'(z)$ dépend continûment de z . La dérivée est donc non nulle dans un voisinage U de \tilde{z} , ce qui assure l'existence d'une fonction Ψ qui aux coefficient c associe une racine du polynôme. La différentielle de Ψ en c s'exprime

$$d\Psi(c) = -(\partial_z f)^{-1} \partial_c f, \text{ avec } z = \Psi(c),$$

et peut donc se représenter matriciellement par

$$\frac{1}{P'(z)} \begin{bmatrix} 1 & z & z^2 & \dots & z^N \end{bmatrix}.$$

Correction de l'exercice II.4.6 (page 53)

On écrit, pour tout $n \leq N$, $c_n = a_n + ib_n$, avec a_n, b_n réels, ou plus globalement $c = a + ib$, avec a et b dans \mathbb{R}^{N+1} . On définit la fonction f de la façon suivante

$$(a, b, x, y) \in \mathbb{R}^{N+1} \times \mathbb{R}^{N+1} \times \mathbb{R}^2 \longmapsto f(a, b, x, y) = P_{a+ib}(x+iy) \in \mathbb{R}^2$$

(on identifie le résultat complexe à un couple de réels, correspondant aux parties réelle et imaginaire). L'équation

$$f(a, b, x, y) = 0$$

exprime que $z = x + iy$ est racine du polynôme P_{a+ib}

On se propose d'appliquer le théorème des fonctions implicites à cette fonction, en vue d'exprimer (x, y) (ou $z = x + iy$) en fonction de (a, b) . En premier lieu on a bien $f(\tilde{a}, \tilde{b}, \tilde{x}, \tilde{y}) = 0 \in \mathbb{R}^2$. La différentielle partielle $\partial_{x,y} f$ est obtenue en faisant un développement limité (on utilise ci-après les notations $c = a + ib$, $z = x + iy$, $h = h_x + ih_y$)

$$\begin{aligned} f(a, b, x+h_x, y+h_y) = P_c(z+h) &= \sum_{n=0}^N c_n(z+h)^n \\ &= \sum_{n=0}^N c_n(z)^n + \sum_{n=1}^N c_n(z)^{n-1}h + o(h) \\ &= f(a, b, x, y) + P'(z)h + o(h). \end{aligned}$$

Si l'on écrit $P'(z) = \alpha + i\beta$ et $h = h_x + ih_y$, la différentielle $\partial_{x,y} f$ s'écrit donc matriciellement

$$\partial_{x,y} f = \begin{pmatrix} \alpha & -\beta \\ \beta & \alpha \end{pmatrix}$$

Le déterminant de cette matrice est $\alpha^2 + \beta^2$. Une matrice de cette forme est donc inversible si et seulement si elle non nulle. Or $P'(\tilde{z}) = \tilde{\alpha} + i\tilde{\beta}$ est non nul en \tilde{z} (car la racine est supposée simple), et $P'(z)$ dépend continûment de z . La différentielle est donc inversible dans un voisinage U de \tilde{z} , ce qui assure l'existence d'une fonction Ψ qui aux coefficient c associe une racine du polynôme.

Pour représenter la différentielle, on a intérêt à reprendre la notation complexe, pour écrire

$$d\Psi(c) = P'_c(z)^{-1} [1 \ z \ \dots \ z^N], \text{ avec } z = \Psi(c),$$

qui est l'application qui, à une variation des coefficients $h = (h_0, h_2, \dots, h_N)$, associe le complexe

$$P'(z)^{-1} \sum_{n=0}^N h_n z^n.$$

On peut retrouver une représentation matricielle réelle, comme application de $\mathbb{R}^{2(N+1)}$ (parties réelle et imaginaire de la variation de la collection c de coefficients) dans \mathbb{R}^2 (parties réelle et imaginaire de la racine), en introduisant explicitement les parties réelle et imaginaire de h .

Correction de l'exercice II.4.7 (page 53)

a) Avec les valeurs de référence données, on trouve

$$T_0 \approx 289 \text{ K} = 16 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Cette température en en général estimée à 15 °C la différence (qui correspond à une variation relative de 0.3 % sur la valeur en Kelvin), s'explique par le fait que les valeurs de S et A sont des estimations. La valeur correspondant à un effet de serre nul est de $-18 \text{ }^\circ\text{C}$.

b) Le modèle peut s'écrire

$$f(S, A, F, T) = \sigma T^4(1 - S) - (1 - A)F = 0.$$

La fonction f est polynomiale, donc différentiable, et l'on a

$$\partial_T f = 4\sigma T^3(1 - S),$$

qui est non nul sur toute la plage $]0, +\infty[$ des températures physiques, et en particulier en T_0 . On peut donc appliquer le théorème des fonctions implicites qui assure l'existence d'un voisinage de T_0 sur lequel on peut exprimer T comme fonction des paramètres S , A , et F . La différentielle de cette application peut s'écrire, d'après le même théorème,

$$dT = -\frac{1}{4\sigma T^3(1 - S)} (-\sigma T^4 dS + F dA - (1 - A) dF).$$

On a donc en particulier

$$\frac{\partial T}{\partial S} = +\frac{T}{4(1 - S)},$$

dont la valeur aux conditions de référence est 120 K (S est sans unité). La variation de S induisant une augmentation de 2 °C de la température est donc $+2/120 \approx 0.016$.

c) La variation relative de la concentration en CO_2 susceptible d'induire une variation de S de 0.016 est donc, si l'on admet que l'effet de serre dû au CO_2 est proportionnel à cette concentration,

$$\frac{\delta c}{c} = \frac{1}{0.6 \times 0.3} 0.016 \approx 0.09.$$

Pour un taux actuel de 415 ppm (parties par million), cela correspond donc à une augmentation de l'ordre de 40 ppm.

d) Le modèle s'écrit maintenant

$$g(S, T) = \sigma T^4(1 - S) - (1 - A_0 + \beta(T - T_0))F_0.$$

La dérivée de g par rapport à T est

$$\partial_T g = 4\sigma T^3(1 - S) - \beta F_0.$$

Pour β petit, plus précisément inférieur à $4\sigma(1 - S_0)$, cette dérivée est strictement positive au voisinage de S_0 , on peut donc utiliser le théorème des fonctions implicites et exprimer T fonction de S , avec une sensibilité modifiée :

$$\partial_S T = \frac{\sigma T^4}{4\sigma T^3(1 - S) - \beta F_0} > \frac{T}{4(1 - S)}.$$

La sensibilité de T vis-à-vis de S est donc augmentée par cet effet (on parle de boucle de rétro-action positive, ou en langage commun de *cercle vicieux*, : quand la température augmente, elle induit un renforcement d'un des facteurs qui tendent à l'augmenter).

La valeur critique est $\beta_c = 4\sigma T^3(1 - S)/F_0 \approx 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Pour cette valeur de β , une augmentation de 10°C diminue l'albedo de 0.01.

Lorsque β s'approche de cette valeur, $\partial_S T$ tend vers $+\infty$, et prend des valeurs négatives pour lorsque β_0 est dépassé. Le fait que les valeurs soit négative pourrait laisser penser que la situation s'est inversée : une augmentation de l'effet de serre entraînerait une *diminution* de la température. La situation est bien sûre tout autre, comme le suggère l'explosion en β_0 . En fait, nous allons vérifier que, pour $\beta \geq 0$, le point d'équilibre considéré n'en est plus un, ou plus précisément que c'est un point d'équilibre *instable*, qui n'a aucune chance d'être observé comme solution pérenne dans la réalité. Pour comprendre ce qui se passe, considérons un modèle dynamique d'évolution de la température, basée sur des hypothèses hautement simplificatrices. On considère que la chaleur (on exclut les autres formes d'énergie) emmagasinée par la terre à un instant donné s'écrit comme le produit d'une constante C (capacité calorifique du système terre-atmosphère) avec la température. On écrit que cette énergie évolue selon le bilan radiatif, que l'on ne suppose plus équilibré :

$$C \frac{dT}{dt} = (1 - A_0 + \beta(T - T_0)) - \sigma T^4(1 - S) = -f(T, S).$$

Pour $S = S_0$, la température T_0 est dite point d'équilibre de l'équation d'évolution, c'est à dire que $T \equiv T_0$ en est une solution triviale. Mais si l'on perturbe légèrement la température, tant que la température reste proche de T_0 , la variation u de cette température vérifie

$$C \frac{du}{dt} = C \frac{d(T_0 + u)}{dt} = -f(T_0 + u, S_0) \approx -f(T_0, S_0) - \partial_T f(T_0, S_0) u.$$

Si $\partial_T f(T_0, S_0) > 0$ (petites valeurs de β), l'évolution peut être décrite par une équation linéaire avec coefficient négatif, qui correspond à une relaxation exponentielle vers la température d'équilibre T_0 . Si $\beta > \beta_0$, on a $\partial_T f(T_0, S_0) < 0$, et l'évolution devient instable, avec une solution du type $u = u_0 \exp(\lambda t)$, $\lambda > 0$. La température a donc tendance à s'éloigner de la température d'équilibre. Noter que, dès que cette température est significativement différente de T_0 , le modèle linéaire n'a plus aucune légitimité, il faut mener une étude du modèle non linéaire pour étudier le comportement en temps long de la solution. En tout cas pour $\beta > \beta_0$, il apparaît que la température T_0 n'est pas un point d'équilibre stable, donc son étude en tant que point d'équilibre pertinent d'un système physique réel n'a pas de sens, ce qui peut expliquer le caractère paradoxal de la négativité de $\partial_S T$ dans ce régime.

Correction de l'exercice II.7.1 (page 61)

Correction de l'exercice II.7.2 (page 61)

a) On a

$$f(x + h) = \langle A \cdot x | x \rangle + \langle A \cdot x | h \rangle + \langle A \cdot h | x \rangle + o(h) = f(x) + \langle (A + A^T) \cdot x | h \rangle + o(h),$$

d'où $\nabla f = (A + A^T) \cdot x$, et par suite $H(x) = A + A^T$.

b) Cette matrice est identiquement nulle si et seulement si la matrice est anti-symétrique.

Correction de l'exercice II.7.3 (page 61)

a) On fait un développement limité à l'ordre 2 (proposition II.5.7), pour obtenir

$$\frac{f(x - \varepsilon h) - 2f(x) + f(x + \varepsilon h)}{\varepsilon^2} = \langle h | H(x) \cdot h \rangle + o(1),$$

qui converge donc vers $\langle h | H(x) \cdot h \rangle$ quand ε tend vers 0.

b) On écrit l'inégalité de convexité au milieu du segment $[x - \varepsilon h, x + \varepsilon h]$ (pour ε suffisamment petit pour que le segment soit dans l'ouvert U), qui implique la positivité de la quantité $f(x - \varepsilon h) - 2f(x) + f(x + \varepsilon h)$, d'où, en faisant tend ε vers 0,

$$\langle h | H(x) \cdot h \rangle \geq 0 \quad \forall h.$$

c) La même démarche conduit à l'inégalité

$$\langle h | H(x) \cdot h \rangle \geq \lambda \|h\|^2 \quad \forall h.$$

On en déduit donc que, en tout x , la plus petite valeur propre de $H(x)$ (qui est bien réelle car H est symétrique) est minorée par λ . On retrouve bien la positivité de H pour les fonctions convexes (i.e. 0 - convexe).

d) Si $\nabla f(x) = 0$ et $\langle H(x) \cdot h | h \rangle > 0$ pour tout h non nul, le développement limité en x assure que x est un minimum local strict pour f , c'est à dire qu'il existe $\eta > 0$ tel que $f(y) > f(x)$ pour tout $y \neq x$ à distance de x inférieure à η .

e) On écrit le développement de Taylor avec reste intégral (proposition II.5.8) entre x et y :

$$f(y) = f(x) + \underbrace{\langle \nabla f(x) | y - x \rangle}_{=0} + \int_0^1 \underbrace{\langle H(x + t(y - x)) \cdot (y - x) | y - x \rangle}_{=0} (1 - t) dt \geq f(x).$$

f) D'après le a), on a, pour tout h , $\langle h | H(x) \cdot h \rangle \geq 0$ pour tout h

Correction de l'exercice II.7.4 (page 62)

On a $\|\nabla f\|^2 / 2 \equiv 1$, d'où, pour tout j

$$0 = \partial_i \left(\|\nabla f\|^2 / 2 \right) = \frac{1}{2} \partial_i \left(\sum_{j=1}^n (\partial_j f)^2 \right) = \sum_{j=1}^n \partial_{ij} f \partial_j f$$

qui exprime précisément que la i - ième composante de $H \cdot \nabla f$ est nulle.

Correction de l'exercice II.7.5 (page 62)

On écrit le développement limité à l'ordre 2 de f en x :

$$f(x + \varepsilon e_\theta) = f(x) + \varepsilon \nabla f(x) \cdot e_\theta + \frac{\varepsilon^2}{2} \langle H \cdot e_\theta | e_\theta \rangle + o(\varepsilon^2).$$

Si l'on intègre $f(x + \varepsilon e_\theta) - f(x)$ entre 0 et 2π , le premier terme (avec le gradient), donne

$$\int_0^{2\pi} \nabla f(x) \cdot e_\theta d\theta = \nabla f(x) \cdot \int_0^{2\pi} e_\theta d\theta = 0.$$

Le terme d'ordre 2 est la somme de 4 contributions. La première s'écrit

$$\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \partial_{11} f(x) \cos(\theta)^2 = \frac{\pi}{2} \partial_{11} f(x).$$

L'autre contribution diagonale (en $\sin(\theta)^2$), vaut de la même manière $\partial_{22} f \pi/2$. Les contributions extra-diagonales sont multiples de l'intégrale de $\sin(\theta) \cos(\theta) = \sin(2\theta)/2$, dont l'intégrale sur $[0, 2\pi[$ vaut 0. On a donc finalement

$$\frac{1}{\varepsilon^2} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (f(x + \varepsilon e_\theta) - f(x)) \longrightarrow \frac{1}{4} (\partial_{11} f(x) + \partial_{22} f(x)) = \frac{1}{4} \Delta f(x).$$

VI.3 Mesure et Intégration

Correction de l'exercice III.2.1 (page 69)

On a

- (i) $\emptyset = \emptyset \cap F \in \mathcal{A}_F$.
- (ii) Pour tout $A \in \mathcal{A}_F$, son complémentaire dans F s'écrit $A^c \cap F$ avec $A^c \in \mathcal{A}$ d'où son appartenance à \mathcal{A}_F , par définition.
- (iii) Si (A_n) est une collection dénombrable d'éléments de \mathcal{A}_F , chaque A_n s'écrit $B_n \cap F$ avec $B_n \in \mathcal{A}$, d'où

$$\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} (B_n \cap F) = F \cap \underbrace{\bigcup_{n \in \mathbb{N}} B_n}_{\in \mathcal{A}}$$

qui est donc dans \mathcal{A}_F par définition.

Correction de l'exercice III.2.2 (page 69)

Si $A = \emptyset$ ou $A = X$, la tribu est $\{\emptyset, X\}$, de cardinal 2, et si A est non vide et strictement inclus dans X , la tribu engendrée est $\{\emptyset, X, A, A^c\}$, de cardinal 4. Noter que si X est de cardinal 1, seul le premier cas est possible.

Correction de l'exercice III.2.3 (page 69)

Si l'union des parties est X (elles réalisent alors une partition), le cardinal est celui de l'ensemble des parties de l'ensemble à 3 points, donc $2^3 = 8$. Si l'union ne recouvre pas X , alors la tribu est celle engendrée par la partition $\{A, B, C, (A \cup B \cup C)^c\}$, qui est donc de cardinal 2^4 .

Correction de l'exercice III.2.4 (page 71)

On suppose $f(x) = x'$ pour tout x (le même x'). Soit $A' \subset X'$. Si $x' \notin A'$, alors $f^{-1}(A') = \emptyset \in \mathcal{A}$, et si $x' \in A'$, alors $f^{-1}(A') = X \in \mathcal{A}$. Il s'agit donc de la tribu discrète, quelle que soit la tribu \mathcal{A} de départ.

Si maintenant \mathcal{A}' est une tribu sur X' , alors l'image réciproque de tous ses membres qui contiennent x' (il en existe au moins un, puisque $X' \in \mathcal{A}'$) est X , et l'image réciproque de tous ses membres qui ne pas contiennent pas x' (il en existe au moins un, puisque $\emptyset \in \mathcal{A}'$) est \emptyset . Il s'agit donc de la tribu grossière, quelle que soit la tribu \mathcal{A}' d'arrivée.

Correction de l'exercice III.2.5 (page 71)

Si f est $\mathcal{A} - \mathcal{A}'$ mesurable, alors \mathcal{A} doit contenir tous les $f^{-1}(A')$ pour $A' \in \mathcal{A}'$, elle contient donc en particulier $f^{-1}(\mathcal{A}')$.

Si f est $\mathcal{A} - \mathcal{A}'$ mesurable, $f^{-1}(A') \in \mathcal{A}$ pour $A' \in \mathcal{A}'$, tout $A' \in \mathcal{A}'$ est donc dans $f_{\#}(\mathcal{A})$.

Correction de l'exercice III.2.6 (page 71)

Soit f une application constante : $f(x) = a' \in X'$. On a

$$f^{-1}(A') = \emptyset \text{ si } x \notin A', \quad f^{-1}(A') = X \text{ si } x \in A',$$

d'où $f^{-1}(A') \in \mathcal{A}$, puisque toute tribu contient \emptyset et X , même la plus grossière d'entre elles.

Correction de l'exercice III.2.7 (page 71)

D'après la définition, l'identité est mesurable si et seulement si tout élément de \mathcal{A}' est dans \mathcal{A} , c'est à dire si $\mathcal{A}' \subset \mathcal{A}$ (\mathcal{A} est plus fine que \mathcal{A}').

Correction de l'exercice III.2.8 (page 72)

Si \mathcal{A} est la tribu discrète, toute application est mesurable. Si \mathcal{A} est la tribu grossière, alors dès qu'il existe A' tel que $f^{-1}(A')$ est non vide et non identifié à X , l'application f n'est pas mesurable. Les seules applications mesurables sont donc les applications qui sont d'une certaine manière constantes, mais dans un sens un peu particulier : elles sont constantes *autant que \mathcal{A}' soit en mesure de distinguer les valeurs*. Plus précisément, il s'agit d'applications telles que, si $f(x) \neq f(y)$, alors nécessairement les éléments de \mathcal{A}' qui contiennent x sont exactement ceux qui contiennent y . En effet, si ça n'est pas le cas, alors il existe $A' \in \mathcal{A}'$ qui contient $f(x)$ et pas $f(y)$, et donc l'image réciproque de A' contient x et pas y , il ne s'agit donc ni de X ni de la partie vide.

Si par exemple la tribu \mathcal{A}' est suffisamment fine pour distinguer tous les éléments, c'est-à-dire que pour tous x' et $y' \in X'$ il existe $A' \in \mathcal{A}$ tel que $x \in A'$, $y \in A'^c$, alors les seules applications mesurables sont les applications constantes $f(x) \equiv a' \in X'$. On peut avoir des situations intermédiaires du type (cas d'une tribu "assez grossière") : si \mathcal{A}' est la tribu engendrée par une partie A' de X' non triviale (ni vide ni totale), une tribu qui contient donc 4 membres (\emptyset , X' , A' et A'^c), alors si \mathcal{A} est la tribu grossière une application est mesurable si et seulement si elle envoie tout le monde dans A , ou tout le monde dans A^c . À l'extrême, si \mathcal{A}' est elle-même la tribu grossière, alors toutes les applications sont mesurables.

La propriété énoncée précédemment dans le cas où \mathcal{A} est la tribu grossière est vraie *a fortiori* pour tout \mathcal{A} : si \mathcal{A}' est la tribu grossière, toute application est mesurable (quelle que soit \mathcal{A}). Si \mathcal{A}' est la tribu discrète, une application est mesurable si et seulement si l'image réciproque de toute partie est dans \mathcal{A} . Si \mathcal{A} est la tribu discrète, tout est mesurable. S'il existe des ensembles non mesurables sur X , dont on note la collection \mathcal{A}^c (complémentaire de \mathcal{A} dans $\mathcal{P}(X)$), alors les applications non mesurables sont celles pour lesquelles il existe un $B \in \mathcal{A}^c$ qui soit image réciproque d'une partie A' de $\mathcal{P}(X')$. Or une partie de X est l'image réciproque d'une partie de X' si et seulement si $f(B) \cap f(B^c) = \emptyset$ (sinon l'image réciproque de l'image de B contient des éléments qui ne sont pas dans B). L'application sera donc mesurable si et seulement si il n'existe aucune partie B de X à l'extérieur de la tribu \mathcal{A} telle que $f(B) \cap f(B^c) = \emptyset$, ce qui peut être délicat à vérifier en pratique ...

Correction de l'exercice III.4.1 (page 78)

Les inégalités à vérifier pour que μ^* soit une mesure extérieure sont toutes des tautologies du type $0 \leq 0$, $0 \leq 1$, $1 \leq 1$, $1 \leq +\infty$.

Si X est un singleton, μ^* est une mesure. En revanche si X contient au moins 2 éléments a et b , on a $\mu(\{a\} \cup \{b\}) = 1 < 2 = \mu(\{a\}) + \mu(\{b\})$, il ne s'agit donc pas d'une mesure.

Si X est réduit à un singleton, toutes les parties (il y en a deux au total : X et \emptyset) sont mesurables. Si ça n'est pas un singleton, alors pour toute partie B de X non vide et non égale à X , on a

$$\mu^*(X \cap B) + \mu^*(X \cap B^c) = 1 + 1 > 1 = \mu^*(X),$$

la partie B n'est donc pas mesurable. Les seules parties mesurables pour μ^* sont donc \emptyset et X .

Correction de l'exercice III.4.2 (page 84)

Toute réunion d'intervalles ouverts dont la somme des longueurs est finie ne pouvant recouvrir \mathbb{R} la mesure extérieure de Lebesgue de \mathbb{R} , qui s'identifie à $\lambda(\mathbb{R})$, est infinie. On peut en revanche écrire \mathbb{R} comme réunion des $] -n, n[$, qui sont tous de mesure finie.

Correction de l'exercice III.6.1 (page 87)

a) Soit φ une bijection de \mathbb{N} . Pour tout $N \in \mathbb{N}$, il existe N' tel que $\{\varphi(n), n \leq N'\}$ contienne tous les indices de 0 à N , on a donc

$$\sum_0^N x_n \leq \sum_0^{N'} x_{\varphi(n)} \leq \sum_0^{+\infty} x_{\varphi(n)},$$

d'où

$$\sum_0^{+\infty} x_n \leq \sum_0^{+\infty} x_{\varphi(n)}.$$

Et l'on montre l'inégalité inverse de la même manière : pour tout N il existe N' tels que $\{n, n \leq N'\}$ contienne $\{\varphi(n), n \leq N\}$, etc ...

b) On déduit des hypothèses que x_n tend vers 0, et que x_n n'est pas nulle au-delà d'un certain rang. Par ailleurs, si l'on note I_+ l'ensemble des indices tels que $x_n \geq 0$, et I_- l'ensemble des indices tels que $x_n < 0$, ces deux ensembles sont infinis, et l'on a (du fait de la non convergence absolue)

$$\sum_{I_+} x_n = +\infty, \quad \sum_{I_-} x_n = -\infty.$$

Pour produire une limite infinie, on commence par prendre des indices dans I_+ jusqu'à ce que la série partielle dépasse 1, puis on prend le premier indice de I_- , puis on continue avec I_+ jusqu'à dépasser 2, puis le deuxième indice de I_- etc ... Le nombre d'étape est forcément infinie du fait de la divergence de la série sur I_+ . On parcourt ainsi tous les indices de I_+ et I_- , et la série diverge vers $+\infty$ par construction (noter que les négatifs que l'on ajoute un par un à chaque étape tendent vers 0). On procède symétriquement pour $-\infty$. Pour λ , par exemple positif, on commence par parcourir les indices de I_+ jusqu'à dépasser λ , puis on passe à I_- jusqu'à passer en dessous de λ , puis I_+ , etc... Comme la suite des x_n tend vers 0, on a bien convergence vers λ . Pour avoir un ensemble de valeurs prises dense dans \mathbb{R} , on monte jusqu'à dépasser 1 avec des indices de I_+ , puis on descend sous -2 , puis on remonte au-dessus de 3, etc ... Comme x_n tend vers 0, les progressions de $-n$ à $n+1$ se font avec un pas de plus en plus petit, on finit donc par intersecter n'importe quel intervalle ouvert, aussi petit soit-il.

Cet exercice montre que cela n'a en général aucun sens d'écrire

$$\sum_{n \in I} x_n$$

lorsque I est un ensemble infini dénombrable et que les x_n prennent des valeurs positives et négatives, du fait que l'ordre dans lequel on effectue les additions conditionne fortement le résultat obtenu.

Correction de l'exercice III.6.2 (page 87)

Pour tout n , on pose

$$I_n = \left\{ i \in I, a_i > \frac{1}{n} \right\}.$$

D'après l'hypothèse, cet ensemble est fini. L'ensemble

$$I_\infty = \{i \in I, a_i > 0\} = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} I_n$$

est donc dénombrable comme union dénombrable d'ensembles finis.

Correction de l'exercice III.6.3 (page 87)

On sait que \mathbb{D} (ou \mathbb{Q}) est dénombrable et dense dans \mathbb{R} , on s'en donne une énumération (q_n) . On considère maintenant la réunion des intervalles ouverts $I_n =]q_n - \varepsilon_n, q_n + \varepsilon_n[$, avec $\varepsilon_n = \varepsilon/2^{n+2}$. Il s'agit d'un ouvert dense, qui est une réunion d'intervalles ouverts (même si certains intervalles de la collection initiale s'intersectent, cela reste une réunion d'intervalles ouverts), dont la longueur totale est majorée par la somme des longueurs des intervalles, qui vaut ε .

Correction de l'exercice III.6.4 (page 87)

Les deux premières conditions sont trivialement vérifiées. Maintenant considérons une famille (A_n) d'éléments de \mathcal{A} . Si tous les A_n sont dénombrables, alors leur union l'est. Si l'un ne l'est pas, alors son complémentaire l'est nécessairement, et donc

$$\left(\bigcup A_n \right)^c = \left(\bigcap A_n^c \right)$$

est dénombrable, donc l'union est bien dans \mathcal{A} .

Si l'ensemble est fini ou dénombrable, toute partie est dans \mathcal{A} , on retrouve donc la tribu discrète.

Correction de l'exercice III.6.5 (page 87)

Si X est dénombrable, toute partie de X est dénombrable, donc réunion dénombrable de singletons. La tribu engendrée par les singletons est donc la tribu discrète $\mathcal{P}(X)$.

Si X n'est pas dénombrable, la tribu engendrée par les singletons contient au moins toutes les parties dénombrables, ainsi que celles de complémentaire dénombrable. Or la famille \mathcal{A} constituée de ces parties est une tribu. En effet, la stabilité par complémentarité est immédiate. Pour la propriété sur l'union dénombrable, il s'agit de l'exercice III.6.4, dont nous reformulons la démonstration. Considérons maintenant une famille (A_n) de \mathcal{A} . Si tous les A_n sont dénombrables, alors leur réunion l'est, elle est donc dans \mathcal{A} . Si l'un d'eux, mettons A_1 n'est pas dénombrable, alors A_1^c l'est, donc l'intersection des complémentaires est dénombrable, et donc son complémentaire, qui est l'union des A_n , est dans \mathcal{A} . Il s'agit donc bien de la tribu engendrée par les singletons.

Correction de l'exercice III.6.6 (page 87)

a) Soit \mathcal{A} une tribu sur N . Soit $x \in X$. On considère A_x le plus petit élément de \mathcal{A} qui contient x . On considère maintenant y dans A_x . Si $x \notin A_y$, alors $A_x \setminus A_y$ est élément de \mathcal{A} , est strictement

inclus dans A , et contient x , ce qui est absurde. On a donc nécessairement $x \in A_y$. Alors A_y s'identifie nécessairement à A_x , car sinon l'intersection des deux est strictement incluse dans au moins l'un d'eux, par exemple A_x , ce qui est absurde car alors A_x ne serait plus le plus petit élément de \mathcal{A} contenant x . La partie A_x contient donc les éléments tels que A_x soit le plus petit élément de \mathcal{A} les contenant. On poursuit avec un point hors de A_x (s'il y en a un), et l'on continue jusqu'à avoir recouvert X_N par p parties non vides disjointes, qui constituent donc une partition P . La tribu engendrée par la partition P est contenue dans \mathcal{A} . Pour tout élément A de \mathcal{A} , son intersection avec chacune des parties de la partition est la partie-elle-même, sinon elle ne serait pas minimale. La tribu \mathcal{A} ne contient donc que des unions de parties de P , donc elle est dans la tribu engendrée par P . On établit ainsi une correspondance univoque (pour un ensemble fini, rappelons-le) entre tribus et partitions. Toute tribu sur X_N est engendrée par une partition de X_N , elle est ainsi caractérisée par cette partition.

b) Le cardinal d'une tribu est défini par la granularité de la partition qui l'engendre. Si la partition contient p parties ($1 \leq p \leq N$), alors la tribu contient autant d'éléments que l'ensemble à p éléments contient de parties, c'est à dire 2^p . Une autre manière de voir les choses est de considérer que l'on peut *coder* un élément de la tribu par un mot de p bits, dont chaque bit indique si l'élément en question contient la partie correspondante.

c) Comme on l'a vu au a), compter les tribus revient à compter les partitions. On suppose connu le nombre B_k de tribus sur l'ensemble à k éléments, pour k entre 0 et N . On rajoute maintenant l'élément $x = n + 1$ à X_N pour obtenir X_{N+1} . On se propose d'énumérer les partitions sur X_{N+1} en les classant selon le nombre k d'éléments qui *ne sont pas* dans la partie qui contient x . Pour $k = 0$, on a une seule partition, constituée de l'ensemble X_{N+1} entier. Pour $k = 1$, on a N possibilités pour choisir l'élément qui n'est pas dans la partie contenant x , et chaque choix correspond à une seule partition. Pour $k \geq 2$, on a C_N^k possibilités de choisir les éléments qui ne sont pas dans la partie contenant x . Pour chacun de ces choix, on a B_k partitions possibles. On a donc

$$B_{N+1} = \sum_{k=0}^N C_N^k B_k,$$

avec $B_0 = 1$ (on considère que l'ensemble vide admet une partition unique, qui est lui-même), et $B_1 = 1$ (tout singleton $\{1\}$ admet une partition unique). On appelle B_N le N -ième nombre de *Bell*, dont on peut montrer qu'il est égal à

$$B_N = \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{k^N}{k!}.$$

Correction de l'exercice III.6.7 (page 87)

On sait que la tribu borélienne est engendrée par les intervalles du type $] - \infty, a]$. Chacun de ces intervalles peut s'écrire comme l'intersection d'intervalles $] - \infty, q_n]$, où q_n est une suite de nombres décimaux qui convergent par valeurs décroissantes vers a . La tribu engendrée par les $] - \infty, q]$, où q est décimal, contient donc les intervalles $] - \infty, a]$, et donc la tribu borélienne, et il s'agit d'un ensemble dénombrable car en bijection avec \mathbb{D} .

Correction de l'exercice III.6.8 (page 87)

a) On a $f^{-1}(\emptyset) = \emptyset \in \mathcal{A}$. Par ailleurs, si $A' \in \mathcal{A}'$, alors

$$f^{-1}((A')^c) = (f^{-1}(A'))^c \in \mathcal{A},$$

d'où la stabilité par passage au complémentaire. On a enfin, si (A'_n) est une collection d'éléments de \mathcal{A}' ,

$$f^{-1}\left(\bigcup_n A'_n\right) = \bigcup_n f^{-1}(A'_n) \in \mathcal{A}.$$

b) Si \mathcal{A}'' est une tribu sur X' qui rend f mesurable, pour tout A'' dans \mathcal{A}'' , on a $f^{-1}(A'') \in \mathcal{A}$, d'où $A'' \in \mathcal{A}'$. On a donc $\mathcal{A}'' \subset \mathcal{A}'$.

c) On a $\nu(\emptyset) = \mu(f^{-1}(\emptyset)) = \mu(\emptyset)$. Par ailleurs, pour toute collection (A'_n) d'éléments disjoints de \mathcal{A}' , on a

$$\nu\left(\bigcup_n A'_n\right) = \mu\left(f^{-1}\left(\bigcup_n A'_n\right)\right) = \sum_n \mu(f^{-1}(A'_n)),$$

car les $f^{-1}(A'_n)$ sont disjoints. Il s'agit donc bien d'une mesure qui fait de (X', \mathcal{A}', ν) un espace mesuré. On a bien sûr conservation de la masse totale, du fait que $\nu(X') = \mu(f^{-1}(X')) = \mu(X)$.

Si la mesure μ est la loi de probabilité d'une variable aléatoire X , alors ν est simplement la loi de la variable aléatoire $f(X)$.

c bis) Remarquons en premier lieu, même si ça ne répond pas encore à la question, que s'il existe un singleton $\{x'\}$ dans \mathcal{A}' de mesure nulle, alors l'application constante $f(x) \equiv x'$ affecte une masse nulle à tout $A \in \mathcal{A}$. Il s'agit bien dans ce cas d'une mesure, mais elle est identiquement nulle, la masse n'est donc pas conservée. On se place maintenant pour simplifier dans le cas où $X' = X$, $\mathcal{A}' = \mathcal{A}$, et considérons le cas où il existe un singleton $\{x'\}$ de mesure non nulle. Alors l'application constante considérée précédemment, donne une même valeur à tous les éléments de \mathcal{A} , ce qui invalide l'additivité (sauf dans des situations très particulières), par exemple dès qu'il existe dans \mathcal{A} deux ensemble disjoints de mesures non nulles.

d) (i) $f(x) = x + c$. Comme vu dans le cours, les translations laissent invariante la mesure de Lebesgue, on a donc $\nu = \lambda$.

(ii) $f(x) = \alpha x$, avec $\alpha \neq 0$. Toute partie A mesurable est dilatée par l'homothétie de rapport α . La mesure d'un objet A dans l'espace d'arrivée est donc $\lambda(A)/\alpha$.

(iii) $f(x) = E(x)$. Cette application balaie en quelque sorte tous les intervalles $[n, n+1[$ et les concentre en $\{n\}$. La mesure image est donc la mesure de comptage sur \mathbb{N} :

$$\nu(A) = \text{Card} \{n \in \mathbb{N}, n \in A\} = \text{Card}(A \cap \mathbb{N}).$$

(iv) $f(x) = 0$. Cette application envoie toute la masse en 0. La mesure image est donc très singulière, il s'agit d'une masse ponctuelle (infinie) en 0 : $\nu(A) = 0$ si $0 \notin A$, $\nu(A) = +\infty$ si $0 \in A$,

(v) En premier lieu, notons que $\nu(A') = 0$ dès que $A' \cap]0, +\infty[= \emptyset$, on a donc

$$\nu(A') = \nu(A' \cap]0, +\infty[).$$

Pour tous a, b , avec $0 < a < b$, la mesure de $]a, b[$ est $\log(b) - \log(a) = \log(b/a)$. On a donc, pour tout $y > 0$, $dy > 0$,

$$\nu(]y, y + dy[) = \log\left(\frac{y + dy}{y}\right) \sim \frac{dy}{y}.$$

La mesure ν a donc sur $]0, +\infty[$ une densité par rapport à la mesure de Lebesgue égale à $1/y$.

e) Soit f et g sont égale μ - presque partout, alors $\mu(f^{-1}(A')) = \mu(g^{-1}(A'))$ pour tout $A' \in \mathcal{B}$.

f) Si μ est une masse ponctuelle, alors $f_{\#}\mu$ est aussi une masse ponctuelle. Si ν ne l'est pas, alors $\Lambda_{\mu, \nu} = \emptyset$. On a un singleton quand les deux sont des masses ponctuelles. Si μ et ν sont toutes deux

sommes de n masses ponctuelles de même poids,

$$\mu = \sum_{i=1}^n \delta_{x_i}, \quad \nu = \sum_{j=1}^n \delta_{y_j},$$

où les x_i sont distincts deux à deux, tout comme les y_j , alors $\Lambda_{\mu, \nu}$ contient $n!$ éléments. En effet, les éléments de $\Lambda_{\mu, \nu}$ sont du type $f(x_i) = y_{\varphi(i)}$, où φ est une bijection sur $\llbracket 1, n \rrbracket$ ($\varphi \in S_n$).

Correction de l'exercice III.6.9 (page 88)

a) On a bien $\mu_0(\emptyset) = 0$ et, pour toute collection disjointe de A_i mesurables, on a

$$\mu_0(\cup A_i) = \text{Card}((\cup A_i) \cap \mathbb{Z}) = \sum_i \text{Card}(A_i \cap \mathbb{Z}),$$

il s'agit donc bien d'une mesure, infinie car $\mathbb{Z} \subset \mathbb{R}$ est infini, mais σ -finie car \mathbb{R} s'écrit comme réunion des intervalles $[-n, n]$.

Les ensembles de mesure pleines pour μ_0 sont simplement les ensembles qui contiennent \mathbb{Z} .

Deux fonctions sont égales μ_0 -presque partout si et seulement si elles prennent les mêmes valeurs sur les entiers, ce qui laisse évidemment de la marge pour les choisir très différentes hors des entiers. Par exemple la fonction $\sin(\pi x)$ est nulle μ_0 - presque partout.

On peut construire une version finie de cette mesure en introduisant des poids, par exemple

$$\tilde{\mu}_0 = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \frac{1}{2^{|k|}} \delta_k,$$

qui donne à \mathbb{R} (ou à n'importe quelle partie qui contient les entiers), une masse égale à 3.

b) la mesure μ_n est du même type que μ_0 , elle en a les mêmes propriétés. On n'a pas absolue continuité relativement à λ car les singletons $\{k/2^n\}$ sont de masse nulle pour λ , non nulle pour μ_n . Inversement les intervalles $]k/2^n, (k+1)/2^n[$ ont une masse non nulle pour λ , nulle pour μ_n .

Pour tout intervalle $]a, b[$ le nombre d'entiers de la forme $k/2^n$ qu'il contient est équivalent à $2^n(b-a)$, ce qui assure la convergence demandée.

c) Considérons par exemple l'ensemble A des nombres de l'intervalle $]0, 1[$ qui ne sont pas de la forme $k/2^n$. C'est ensemble est de mesure pleine sur $]0, 1[$, car on a enlevé un ensemble dénombrable, donc de mesure nulle. On a ainsi $\lambda(A) = 1$, et pourtant $\mu_n(A) = 0$ pour tout n .

Correction de l'exercice III.6.10 (page 89)

a) On a

$$A \cup B = (A \setminus (A \cap B)) \cup (B \setminus (A \cap B)) \cup (A \cap B) \text{ (union disjointe),}$$

d'où

$$\begin{aligned} \mu(A \cup B) &= \mu(A) - \mu(A \cap B) + \mu(B) - \mu(A \cap B) + \mu(A \cap B) \\ &= \mu(A) + \mu(B) - \mu(A \cap B). \end{aligned}$$

b) On écrit

$$\mu(A \cup B \cup C) = \mu((A \cup B) \cup C) = \mu(A \cup B) + \mu(C) - \mu((A \cup B) \cap C).$$

On développe $\mu(A \cup B)$ d'après ce qui précède, et l'on écrit

$$\mu((A \cup B) \cap C) = \mu((A \cap C) \cup (B \cap C)) = \mu(A \cap C) + \mu(B \cap C) - \mu(A \cap B \cap C).$$

c) On peut montrer par récurrence la formule générale

$$\begin{aligned} \mu\left(\bigcup_{n=1}^N A_n\right) &= \sum_{1 \leq n \leq N} \mu(A_n) - \sum_{1 \leq i_1 < i_2 \leq N} \mu(A_{i_1} \cap A_{i_2}) + \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < i_3 \leq N} \mu(A_{i_1} \cap A_{i_2} \cap A_{i_3}) \\ &\quad + (-1)^N \mu(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_N). \end{aligned}$$

Correction de l'exercice III.6.11 (page 89)

a) Il s'agit d'une mesure de comptage, dont on vérifie immédiatement que c'est bien une mesure. Tout ouvert non vide contient un intervalle ouvert, donc une infinité de rationnels, sa mesure est donc infinie. Et la mesure de l'ouvert \emptyset est 0.

On note A_n l'ensemble des rationnels qui s'écrivent $\pm a/b$, avec a et b des entiers naturels entre 0 et n . On a $\mu(A_n \cap [-n, n]) < +\infty$, et l'union des $A_n \cap [-n, n]$ recouvre \mathbb{R} .

b) On a $\mu(]0, 1[\cap \mathbb{Q}) = +\infty$ et $\lambda(]0, 1[\cap \mathbb{Q}) = 0$ ce qui invalide $\mu \ll \lambda$, et dans l'autre sens $\mu(]0, 1[\cap \mathbb{Q}^c) = 0$ et $\lambda(]0, 1[\cap \mathbb{Q}^c) = 1$, ce qui invalide $\lambda \ll \mu$.

Correction de l'exercice III.6.12 (page 89)

a) L'ensemble A est la collection des intervalles $[k \times 10^{-n+1}, (k+1/2) \times 10^{-n+1}[$. L'intersection d'un intervalle de longueur 10^{-n+1} avec A est donc de longueur totale $10^{-n+1}/2$, d'où le résultat pour les intervalles dont la longueur est un multiple entier de cette quantité.

Soit maintenant $I =]a, b[$ un intervalle. Pour tout N , on a

$$b - a = k_N \times 10^{-N} + \varepsilon_N$$

avec $E(x)$ est la partie entière de x

$$k_N = E((b - a) \times 10^N), \quad \varepsilon_N = b - a - k_N \times 10^{-N} \in [0, 10^{-N}].$$

l'intervalle s'écrit donc comme la réunion d'un intervalle dont la longueur est multiple de 10^{-N} , avec un intervalle de longueur $\varepsilon_N < 10^{-N}$. On a donc

$$\lambda(]a, b[\cap A_{N+1}) \geq \frac{b - a - \varepsilon_N}{2} \geq \frac{b - a}{2} - \frac{1}{2} 10^{-N},$$

et

$$\lambda(]a, b[\cap A_{N+1}) \leq \frac{b - a - \varepsilon_N}{2} + \varepsilon_N \leq \frac{b - a}{2} + 10^{-N},$$

d'où la convergence de $\lambda(]a, b[\cap A_{N+1})$ vers $(b - a)/2$.

b) On se restreint à l'intervalle $]0, 1[$, en considérant l'ensemble $A' = A \cap]0, 1[$. D'après les hypothèses on a $\lambda(A') = 1/2$. L'ensemble A' étant mesurable, sa mesure s'identifie à sa mesure extérieure

$$\lambda(A') = \inf_{C_{A'}} \left(\sum_i (b_i - a_i) \right),$$

avec

$$C_{A'} = \left\{ (]a_i, b_i[)_{i \in \mathbb{N}}, A' \subset \bigcup_{\mathbb{N}}]a_i, b_i[\right\}.$$

Il existe donc une collection d'intervalles ouverts dont l'union contient A' telle que

$$\sum_i (b_i - a_i) \leq 3/4.$$

On note U la réunion ci-dessus. Comme $A' \subset U$, on a

$$\frac{1}{2} = \lambda(A') = \lambda(A' \cap U) \leq \sum_i \lambda(A' \cap]a_i, b_i[) = \frac{1}{2} \sum_n (b_i - a_i) = 3/8,$$

ce qui est absurde.

Correction de l'exercice III.6.13 (page 90)

a) L'ensemble K est une intersection de fermés (comme unions finies d'intervalles fermés), il s'agit donc d'un fermé, qui est borné par construction, donc d'un compact. Si K contient un intervalle ouvert, cet intervalle est dans chacune des K_n , réunion d'intervalles de longueur $1/3^n$, sa longueur est donc inférieure à tout $1/3^n$, donc nécessairement nulle.

b) À toute suite $a = (a_n)_{n \geq 1}$ dans $\{0, 1\}$, on peut associer

$$x_a = \sum_{n=0}^{+\infty} 2^{-n} a_n \frac{1}{3^n}.$$

Le réel x_a appartient à K . En effet, la série partielle définit x_a^n qui est l'extrémité gauche de l'un des intervalles de K_n . La suite x_a^n est donc dans K , et elle est de Cauchy par construction, elle converge donc dans \mathbb{R} , donc dans K car K est fermé. Cette application $\{0, 1\}^{\mathbb{N}^*} \rightarrow K$ est injective. Or l'ensemble de départ s'identifie à l'ensemble des parties de \mathbb{N}^* , qui est non dénombrable.

c) On a $\lambda(K_n) = 2^n/3^n$, et $K \subset K_n$ pour tout n , d'où $\lambda(K) \leq 2^n/3^n \rightarrow 0$.

Correction de l'exercice III.7.1 (page 91)

Considérons la fonction f par exemple croissante. Soit $c \in \mathbb{R}$. Pour tout x dans l'ensemble $f^{-1}(]-\infty, c])$, tout $z \leq x$ est dans ce même ensemble d'après la croissance de f . L'ensemble est donc du type $] - \infty, a]$ ou $] - \infty, a[$ (avec éventuellement $a = +\infty$), qui sont des boréliens dans les deux cas, donc a fortiori des membres de la tribu de Lebesgue. La démonstration est semblable pour une fonction décroissante (avec des intervalles de type $[a, +\infty[$ ou $]a, +\infty[$).

Correction de l'exercice III.7.2 (page 97)

Soit g une fonction étagée positive

$$g(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \mathbb{1}_{A_i},$$

Si g est dominée par $I_{\mathbb{Q}}$, alors pour tout i tels que $\alpha_i > 0$, nécessairement $A_i \subset \mathbb{Q}$, d'où $\lambda(A_i) = 0$. On a donc $\int g = 0$ d'où, d'après la définition $\int_{\mathbb{R}} \mathbb{1}_{\mathbb{Q}}(x) d\lambda = 0$.

Correction de l'exercice III.7.3 (page 99)

a) On note

$$u_n = \int_{n\pi}^{(n+1)\pi} \frac{\sin(x)}{x} dx.$$

La série $\sum u_n$ est alternée, avec

$$|u_n| \leq \frac{1}{n\pi} \int_0^\pi \sin(x) = \frac{2}{n\pi},$$

qui tend vers 0 quand n tend vers $+\infty$. La série est donc convergente, l'intégrale généralisée l'est donc aussi.

b) On a

$$|u_n| \geq \frac{1}{(n+1)\pi} \int_0^\pi \sin(x) = \frac{2}{(n+1)\pi}.$$

La série n'est donc pas absolument convergente, g n'est donc pas intégrable sur $]0, +\infty[$.

Correction de l'exercice III.7.4 (page 101)

La fonction définie par $f_n(x) = f(x) \cos(x)^n$ converge presque partout (sur le complémentaire des $k\pi x$) vers 0, et l'on a, pour tout x , $|f_n(x)| \leq |f(x)|$, avec $\int |f| < +\infty$. D'après le théorème de convergence dominée (théorème III.7.25, page 101), on a donc convergence des intégrales vers l'intégrale de la limite, qui est 0.

Correction de l'exercice III.8.1 (page 104)

a) Pour tout rectangle $A_1 \times A_2 \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$, on a

$$F^{-1}(A_1 \times A_2) = f_1^{-1}(A_1) \times f_2^{-1}(A_2) \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2,$$

d'où l'on déduit que F est mesurable d'après la proposition III.2.12, page 71, qui assure qu'il suffit de vérifier la mesurabilité sur un sous ensemble de parties de l'espace d'arrivée qui engendre la tribu sur cet espace.

b) Pour tout rectangle $A_1 \times A_2 \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$, on a

$$F^{-1}(A_1 \times A_2) = f_1^{-1}(A_1) \cap f_2^{-1}(A_2) \in \mathcal{A},$$

d'où l'on déduit que G est mesurable, toujours d'après la proposition III.2.12.

Correction de l'exercice III.10.1 (page 113)

À tout $u = (u_n) \in \ell^p$ on associe la fonction

$$Tu = f = \sum_{n=0}^{+\infty} u_n \mathbb{1}_{]n, n+1[}.$$

Si l'on note f_n la somme partielle, $|f_n|^p$ est une suite croissante de fonctions mesurables, qui converge presque partout vers $|f|^p$. D'après le théorème de convergence monotone (théorème III.7.23, page 100), comme $\int |f_n|^p$ converge vers $\sum u_n^p < +\infty$, la fonction $|f|^p$ est intégrable, et d'intégrale $\|u\|_{\ell^p}^p$. L'application T réalise donc une isométrie entre ℓ^p et un sous-espace strict de $L^p(\mathbb{R})$.

Correction de l'exercice III.10.2 (page 114)

L'adhérence de $C_c(\mathbb{R})$ dans $L^\infty(\mathbb{R})$ est l'espace des fonctions continues qui tendent vers 0 en $\pm\infty$. Le fait que ce soit des fonctions continues est immédiat par convergence uniforme. Par ailleurs, si f est limite des f_n dans $C_c(\mathbb{R})$, pour tout $\varepsilon > 0$, il existe n tel que $\|f_n - f\|_\infty < \varepsilon$. Comme f_n est à support compact, elle est nulle en dehors de $[-M, M]$, on a donc $|f(x)| < \varepsilon$ pour tout x avec $|x| \geq M$.

Réciproquement, si f continue tend vers 0 en $\pm\infty$, on peut approcher f en norme uniforme par la suite de fonctions f_n continues à support compact, où f_n s'identifie à f sur $[-n, n]$ est affine sur les intervalles $[-n-1, -n]$ et $[n, n+1]$, et s'annule au delà.

Correction de l'exercice III.12.1 (page 115)

La fonction f étant dérivable, elle est continue, et donc mesurable (proposition III.7.4, page 93). Pour tout $n \geq 1$, la fonction g_n définie par

$$g_n(x) = \frac{f(x + 1/n) - f(x)}{1/n}$$

est elle-même continue, donc mesurable. La fonction f' s'exprime

$$f'(x) = \lim_{n \rightarrow +\infty} g_n(x) = \limsup_{n \rightarrow +\infty} g_n(x).$$

L'application f' est donc mesurable d'après la proposition III.7.2, page 91.

Correction de l'exercice III.12.2 (page 115)

Les B_n constituant une partition de X , on a

$$\int_X |f| = \sum_n \int_{B_n} |f|,$$

avec, pour tout n

$$n\mu(B_n) \leq \int_{B_n} |f| \leq (n+1)\mu(B_n).$$

On a donc

$$\int_X |f| < +\infty \iff \sum_n \int_{B_n} |f| < \infty \iff \sum_n n\mu(B_n) < \infty.$$

Pour montrer (ii) \iff (iii), on écrit

$$\mu(B_n) = \mu(A_n) - \mu(A_{n+1}).$$

En multipliant l'identité par n , et en sommant les termes de 1 à N , on obtient

$$\sum_1^N n\mu(B_n) = \sum_1^N \mu(A_n) - N\mu(A_{N+1}).$$

Si $\sum \mu(A_n)$ converge, alors $\sum n\mu(B_n)$ est bornée donc converge aussi.

Réciproquement, si $\sum n\mu(B_n)$ converge, alors la fonction f est intégrable d'après ce qui précède, et on a (proposition III.7.21, page 99)

$$\mu(A_N) = \mu(\{x \in X, |f(x)| \geq N\}) \leq \frac{1}{N} \int |f|,$$

d'où l'on déduit que $N\mu(A_{N+1}) \leq (N+1)\mu(A_{N+1})$ est borné, d'où la convergence de la série des $\mu(A_n)$.

Correction de l'exercice III.12.3 (page 115)

Il s'agit d'une application du lemme de Fatou (lemme III.7.24, page 101), qui assure que

$$\int \liminf_n f_n \, d\mu \leq \liminf_n \int f_n \, d\mu.$$

Comme on a convergence simple de f_n vers f , on a $\liminf_n f_n = f$, d'où le résultat.

Correction de l'exercice III.12.4 (page 115)

a) On introduit la fonction $f_n = \mathbb{1}_{A_n^c} f$. La suite $|f_n|$ converge simplement vers $|f|$, avec $|f_n(x)| \leq |f(x)|$ pour tout x , et $|f|$ intégrable. D'après le théorème de convergence dominée (théorème III.7.25, page 101), on a convergence de l'intégrale $|f_n|$ vers l'intégrale de $|f|$, d'où

$$\int_{A_n} |f(x)| \, d\mu = \int_X |f(x)| \, d\mu - \int_X |f_n(x)| \, d\mu \longrightarrow 0.$$

b) D'après la question précédente, il existe n tel que

$$\int_{A_n} |f(x)| \, d\mu < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Sur le complémentaire de A_n , on a $|f(x)| < n$. On prend $\delta = \varepsilon/(2n)$. Pour tout $A \in \mathcal{A}$ tel que $\mu(A) < \delta$, on a

$$\int_A |f(x)| \, d\mu = \int_{A \cap A_n} |f(x)| \, d\mu + \int_{A \cap A_n^c} |f(x)| \, d\mu < \frac{\varepsilon}{2} + n \frac{\varepsilon}{2n} = \varepsilon.$$

Correction de l'exercice III.12.5 (page 115)

On note

$$f_n(x) = \frac{1 + nx^3}{(1 + x^2)^n}.$$

On a

$$0 \leq f_n(x) \leq \frac{1 + nx^3}{1 + nx^2} \leq \frac{1 + nx^3}{1 + nx^3} \leq 1,$$

et $f_n(x)$ converge vers 0 pour tout $x \in]0, 1]$. On a, d'après le théorème de convergence monotone, convergence des intégrales u_n vers $\int 0 = 0$.

On note $g_n(x) = \sin(\pi x)/(1 + x^n)$. Pour $n \geq 2$, on a $|g_n(x)| \leq 1/(1 + x^2)$, qui est intégrable. On peut donc appliquer le théorème de convergence dominée qui assure la convergence des intégrales vers l'intégrale de la limite simple, qui est la fonction g définie par $g(x) = \sin(\pi x)$ sur $]0, 1[$ et 0 sur $]1, +\infty[$. On a donc convergence de v_n vers $2/\pi$.

Correction de l'exercice III.12.6 (page 116)

a) Le fait que $f(\cdot, t)$ soit mesurable, et la condition (ii) assurent que l'intégrale est bien définie. Il s'agit maintenant de montrer la continuité. Soit t_n une suite de réels qui tend vers t , on pose $f_n(x) = f(x, t_n)$. La continuité de f par rapport à t assure la convergence simple de $f(\cdot, t_n)$ vers $f(\cdot, t)$. La condition (iii) permet d'appliquer le théorème de convergence dominée, qui assure la convergence des intégrales :

$$\int_X f(x, t_n) \, d\mu(x) \longrightarrow \int_X f(x, t) \, d\mu(x).$$

b) Soit $t \in I$ et $\varepsilon > 0$ tel que $t \pm \varepsilon \in I$. On définit (la fonction Φ introduite ci-dessous est définie pour ce t particulier)

$$\Phi : (x, s) \in X \times]-\varepsilon, \varepsilon[\longrightarrow \Phi(x, s) = \begin{cases} \frac{f(x, t+s) - f(x, t)}{s} & \text{si } s \neq 0 \\ \frac{\partial f}{\partial t}(x, t) & \text{si } s = 0 \end{cases}$$

La fonction $\Phi(\cdot, s)$ est mesurable pour tout $s \neq 0$, comme $\Phi(x, 0)$ est la limite de $\Phi(x, s)$ quand s tend vers 0, la fonction $\Phi(\cdot, 0)$ est également mesurable. La fonction $s \mapsto \Phi(x, s)$ est continue pour tout x d'après l'hypothèse de différentiabilité de f . On a par ailleurs $|\Phi(x, s)| \leq h(x)$ d'après le théorème des accroissements finis. On peut donc appliquer la première question, qui assure

$$\frac{F(t+s) - F(t)}{s} = \int_X \Phi(x, s) d\mu(x) \longrightarrow \int_X \Phi(x, 0) d\mu(x) = \int_X \frac{\partial f}{\partial t}(x, t) d\mu(x).$$

qui exprime la dérivabilité de F .

Correction de l'exercice III.12.7 (page 116)

a) On a

$$\mu_1(A_1) = \gamma(\pi_1^{-1}(A_1)) = \gamma(A_1 \times X_2),$$

et de même $\mu_2(A_2) = \gamma(X_1 \times A_2)$. On a en particulier $\mu_1(X_1) = \gamma(X_1 \times X_2) = \mu_2(X_2)$.

On n'a pas en général $\gamma = \mu_1 \otimes \mu_2$. Si l'on considère par exemple $X_1 = X_2 = \{0, 1\}$, et

$$\gamma(\{0, 0\}) = \gamma(\{1, 1\}) = 1/2, \quad \gamma(\{1, 0\}) = \gamma(\{0, 1\}) = 1/2.$$

On a $\mu_1(\{0\}) = \mu_1(\{1\}) = \mu_2(\{0\}) = \mu_2(\{1\}) = 1/2$, de telle sorte que $\gamma \neq \mu_1 \otimes \mu_2$.

Si γ est la loi d'une variable aléatoire $(Y_1, Y_2) \in X_1 \times X_2$, μ_i est simplement la loi de Y_i . La situation $\gamma = \mu_1 \otimes \mu_2$ correspond au cas de variables aléatoires indépendantes.

b) Dans le cas où $X_1 = X_2 = \llbracket 1, N \rrbracket$, les singletons sont des rectangles, et la mesure γ est entièrement déterminée par sa valeurs sur les singletons. La mesure s'identifie donc à une matrice $\gamma = (\gamma_{ij})$, avec $\gamma_{ij} = \gamma(\{(i, j)\})$. La première marginale μ_1 correspond à la somme des éléments des lignes :

$$(\mu_1)_i = \sum_{j=1}^N \gamma_{ij},$$

et μ_2 la somme des éléments des colonnes successives.

c) On peut toujours prendre pour γ la mesure produit $\mu_1 \otimes \mu_2$, qui correspondrait à des variables aléatoires indépendantes dans le cas de mesures de probabilité).

d) On peut identifier les plans de transport à des matrices $\gamma = (\gamma_{ij})$, et on a

$$\Pi_{\mu_1, \mu_2} = \left\{ \gamma = (\gamma_{ij}) \in \mathbb{R}_+^{n \times m}, \sum_{i=1}^n \gamma_{ij} = \mu_2^j, \sum_{j=1}^m \gamma_{ij} = \mu_1^i \right\}.$$

Il s'agit donc d'un ensemble de matrices dont la somme des éléments de chaque ligne, et de chaque colonne, est fixée. C'est un convexe (intersection d'un sous-espace vectoriel avec le convexe $\mathbb{R}_+^{n \times m}$). C'est un singleton dès que l'une des mesures (arrivée ou départ) est concentrée en un point unique. Dès qu'on a deux points chargés de part et d'autre, il existe plusieurs plans de transport.

e) L'application considérée est linéaire donc continue, elle est donc minorée sur le compact Π_{μ_1, μ_2} , et atteint sa borne inférieure en au moins un point. L'application n'est pas strictement convexe, il n'y a pas de raison que ce point soit unique. De fait il ne l'est pas en général, c'est clair dans des cas dégénérés (par exemple si tous les coûts sont égaux à une même valeur), mais aussi par exemple dans le cas de points (au moins 2 points à l'arrivée et au départ) appartenant à une même droite, avec $c_{ij} = \|y_j - x_i\|$. On pourra considérer par exemple (on se place sur la droite réelle) $x_1 = 0$, $x_2 = 1$, $y_1 = 1$, $y_2 = 2$, avec des masses égales. On peut laisser la masse en x_2 sur place (en y_1), et envoyer la masse en x_1 en y_2 , on translate de 1 la mesure. Noter que si le coût est quadratique en la distance, alors on a une solution unique (qui correspond à la translation).

f) Dans ce cas de figure, le problème consistant à trouver une solution du problème de minimisation revient à trouver un protocole d'envoi de la masse portée par les points de production vers les points de consommation de façon à minimiser le coût total de transport. Par exemple si c_{ij} correspond à la longueur du parcours routier entre x_i et y_j , cela revient à minimiser la longueur totale du parcours, et donc en première approximation l'essence consommée³.

g) On peut simplement définir l'opposé de la valeur ajoutée

$$A = - \sum_{ij} u_{ij} \gamma_{ij}.$$

Minimiser A revient à maximiser la valeur ajoutée, et le problème obtenu est du type des précédents, avec des coûts c_{ij} égaux aux opposés des productivités $i - j$.

Correction de l'exercice III.12.8 (page 117)

a) La fonction qui à (x, t) associe $f(x)$ est mesurable (car l'image réciproque de $] - \infty, c]$ est $f^{-1}(] - \infty, c]) \times \mathbb{R}_+$).

La fonction qui à (x, t) associe t est mesurable, car l'image réciproque de $] - \infty, c]$ est $X \times [0, c]$ (qui est l'ensemble vide si $c < 0$).

L'application $F : (x, t) \mapsto f(x) - t$ est donc mesurable d'après la proposition III.7.3, page 92.

b) L'image réciproque de $] - \infty, c]$ par $\mathbb{1}_{\{(x, t), f(x) \geq t\}}$ est $X \times \mathbb{R}_+$ si $c \geq 1$, l'ensemble vide si $c < 0$ et, pour $c \in [0, 1[$, elle s'écrit

$$\{(x, t), t > f(x)\} = F^{-1}(] - \infty, 0]),$$

qui est mesurable d'après la mesurabilité de F (d'après la question précédente).

c) D'après ce qui précède, la fonction $\mathbb{1}_{\{(x, t), f(x) \geq t\}}$ rentre dans le cadre du théorème de Fubini-Tonelli (théorème III.8.10, page 104), on a donc

$$\begin{aligned} \int_0^{+\infty} \mu(\{x, f(x) \geq t\}) dt &= \int_0^{+\infty} \left(\int_X \mathbb{1}_{\{(y, s), f(y) \geq s\}}(x, t) d\mu \right) dt \\ &= \int_{X \times [0, +\infty[} \mathbb{1}_{\{(y, s), f(y) \geq s\}}(x, t) d\mu dt = \int_X \left(\int_0^{+\infty} \mathbb{1}_{\{(y, s), f(y) \geq s\}}(x, t) dt \right) d\mu, \\ &= \int_X f(x) d\mu, \end{aligned}$$

car $\int_0^{+\infty} \mathbb{1}_{\{(y, s), f(y) \geq s\}}(x, t) dt = f(x)$ pour tout x .

3. Le problème réel est en général plus complexe, dans la mesure où le coût s'écrit, pour de petites masses à transporter, comme un coût fixe, dû au fait que l'on fait partir un camion. L'approche proposée correspond au cas où l'on a des grandes masses de produit à transporter, et donc un nombre de camions important à mobiliser (que l'on peut alors considérer comme une variable réelle).

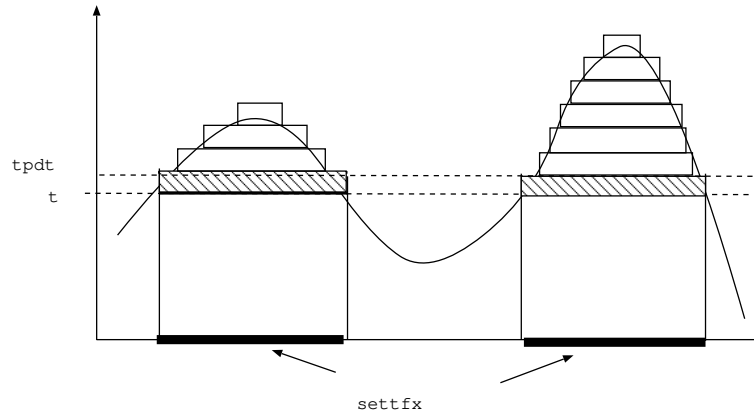


FIGURE VI.3.1 – Quadrature par rectangles horizontaux

d) Le dessin est représenté sur la figure VI.3.1. L'aire de la zone hachurée vaut

$$\lambda(\{x, f(x) \leq t\} \times \delta t),$$

et l'aire sous la courbe est approchée par la somme de ces aires.

Correction de l'exercice III.12.9 (page 117)

Comme dans l'exercice III.12.8, la fonction $(x, t) \mapsto f(x) - t$ est mesurable, on en déduit que $\mathbb{1}_{\{(x, t), f(x) \geq t\}}$ est également mesurable sur $X \times \mathbb{R}_+$, et elle est à valeurs dans \mathbb{R}_+ . Elle rentre donc dans le cadre du théorème de Fubini-Tonelli (théorème III.8.10, page 104), et l'on a

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} \mu(\{x, f(x) = t\}) dt &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_X \mathbb{1}_{\{(y, s), f(y) = s\}}(x, t) d\mu \right) dt \\ &= \int_{X \times \mathbb{R}} \mathbb{1}_{\{(y, s), f(y) = s\}}(x, t) d\mu dt = \int_X \left(\int_{\mathbb{R}} \mathbb{1}_{\{(y, s), f(y) = s\}}(x, t) d\mu \right) dt \\ &= \int_X \lambda(\{t, t = f(x)\}) d\mu(x), \end{aligned}$$

or pour tout x l'ensemble $\{t, t = f(x)\}$ est le singleton $\{f(x)\}$, il est donc de mesure nulle. L'intégrale est donc nulle, d'où l'on déduit que la fonction positive $t \mapsto \mu(\{x, f(x) = t\})$ est d'intégrale nulle, elle est donc nulle presque partout (c'est une conséquence de la proposition III.7.21, page 99).

Correction de l'exercice III.12.10 (page 117)

On a, pour tout $y > 0$,

$$\int_{\mathbb{R}_+} (2e^{-2xy} - e^{-xy}) dx = \left[\frac{1}{y} (-e^{-2xy} + e^{-xy}) \right]_0^{+\infty} = 0$$

d'où la nullité de la première expression. En intégrant d'abord en y , on a, pour tout $x > 0$

$$\int_0^1 (2e^{-2xy} - e^{-xy}) dy = \frac{1}{x} [-e^{-2x} + e^{-x}]$$

qui est strictement positif pour tout $x > 0$, l'intégrale en x sur \mathbb{R}_+ va donc donner une valeur strictement positive.

Ceci semble en contradiction avec le théorème de Fubini-Lebesgue, cela prouve simplement que ses hypothèses ne sont pas vérifiées, c'est à dire que la fonction n'est pas intégrable sur la bande considérée.

Correction de l'exercice III.12.11 (page 118)

a) On a

$$\int_{-1}^1 \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2} dx = \left[-\frac{x}{(x^2 + y^2)^2} \right]_{-1}^1 = -\frac{2}{1 + y^2}.$$

L'intégrale de cette fonction en y vaut

$$-2 [\arctan y]_{-1}^1 = -\pi$$

En intégrant dans l'autre sens (d'abord en y , puis en x , on obtient π).

b) On n'a pas de contradiction avec le théorème de Fubini-Lebesgue car la fonction n'est pas intégrable au voisinage de 0. On peut s'en convaincre en calculant l'intégrale sur la couronne $\{(x, y), \varepsilon < \sqrt{x^2 + y^2} < 1\}$. En passant en coordonnées polaires, on a

$$\begin{aligned} \int_{\{(x,y), \varepsilon < \sqrt{x^2+y^2} < 1\}} |f(x,y)| dx dy &= \int_{\varepsilon}^1 \int_{-\pi}^{+\pi} \frac{r^2 |\cos^2 \theta - \sin^2 \theta|}{r^4} r dr d\theta \\ &= 8 \int_{\varepsilon}^1 \frac{1}{r} \int_0^{\pi/4} \cos(2\theta) dr d\theta = -4 \ln(\varepsilon), \end{aligned}$$

qui tend vers $+\infty$ quand ε tend vers 0.

Correction de l'exercice III.12.12 (page 118)

a) On considère

$$T : (r, \theta) \in U =]0, +\infty[\times]-\pi, \pi[\mapsto (r \cos \theta, r \sin \theta) \in V = \mathbb{R}^2 \setminus \{0\}.$$

Il s'agit d'un C^1 -difféomorphisme entre 2 ouverts de \mathbb{R}^2 , et l'intégrale de la fonction f sur V est la même que sur \mathbb{R}^2 , car ces ensembles ne diffèrent que par un ensemble de mesure nulle. La formule de changement de variable s'écrit ici

$$I = \int_V e^{-(x^2+y^2)} dx dy = \int_0^{+\infty} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-((r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta)^2)} |\det J_T| dr d\theta = \int_0^{+\infty} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-r^2} |\det J_T| dr d\theta,$$

avec

$$\det J_T = \det \begin{pmatrix} \cos \theta & -r \sin \theta \\ \sin \theta & +r \cos \theta \end{pmatrix} = r(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) = r,$$

d'où

$$I = 2\pi \int_0^{+\infty} r e^{-r^2} dr = 2\pi [-e^{-r^2}/2]_0^{+\infty} = \pi.$$

b) On a, d'après le théorème de Fubini

$$\int_{\mathbb{R}^2} e^{-(x^2+y^2)} dx dy = \int_{\mathbb{R}} \left(\int_{\mathbb{R}} e^{-(x^2+y^2)} dy \right) dx = \int_{\mathbb{R}} e^{-x^2} \left(\int_{\mathbb{R}} e^{-y^2} dy \right) dx = \left(\int_{\mathbb{R}} e^{-x^2} dx \right)^2.$$

On en déduit

$$\int_{\mathbb{R}} e^{-x^2} dx = \sqrt{\pi}.$$

c) En dimension d , on a

$$I = \int_{\mathbb{R}^d} f(x) dx = \int_{\mathbb{R}^d} e^{-\frac{x_1^2 + \dots + x_d^2}{2\sigma^2}} dx$$

Le changement de variable homothétique $T : y \mapsto x = \sqrt{2}\sigma y$, de jacobien constant $2^{d/2} \sigma^d$, donne

$$I = 2^{d/2} \sigma^d \int_{\mathbb{R}^d} e^{-(y_1^2 + \dots + y_d^2)} dy = 2^{d/2} \sigma^d \left(\int_{\mathbb{R}} e^{y^2} dy \right)^d = 2^{d/2} \sigma^d \pi^{d/2} = (2\sigma^2 \pi)^{d/2}.$$

D'où la valeur de la constante de normalisation, et le fait que

$$\frac{1}{(2\sigma^2 \pi)^{d/2}} e^{-\frac{x_1^2 + \dots + x_d^2}{2\sigma^2}}$$

soit une mesure de probabilité (i.e. de masse totale égale à 1).

Correction de l'exercice III.12.13 (page 118)

On considère la suite $f_n(x) = \mathbb{1}_{]0, n[}(x)$, qui est dans la boule unité fermée de L^∞ . Deux termes différents de cette suites sont toujours à distance 1, il est donc exclu que l'on puisse en extraire une sous-suite convergente. La non compacité ne vient pas de la non compacité de \mathbb{R} , on peut construire une suite analogue de fonction à support compact, par exemple $f_n(x) = \mathbb{1}_{]0, 1-1/n[}(x)$.

Correction de l'exercice III.12.14 (page 118)

a) Soit $f \in L^p(I)$. On a, pour tout x dans I tel que $|f(x)| \geq 1$,

$$|f(x)| \leq |f(x)| |f(x)|^{p-1} = |f(x)|^p,$$

d'où l'on déduit que

$$|f(x)| \leq \max(1, |f(x)|^p),$$

et donc $|f(x)|$ est intégrable.

b) Tout d'abord remarquons que l'inclusion ci-dessus est stricte, si l'on prend par exemple l'intervalle $I =]0, 1[$, la fonction définie par $f(x) = x^{-1/p}$ est dans L^1 , pas dans L^p . Par ailleurs $L^p(I)$ est dense dans L^1 , il contient en particulier les fonctions continues à support compact, qui sont denses dans L^1 . Comme cette densité des fonctions continues à support compact n'a pas été traitée en amphi, on peut aussi utiliser la troncature de l'exercice III.12.15 qui suit, si on l'a fait avant. Elle assure que l'on peut approcher toute fonction de L^1 par une suite de fonctions bornées, donc dans L^p (on est sur un intervalle borné). On a donc densité de $L^p(I)$ dans $L^1(I)$, mais inclusion stricte, L^p ne peut donc pas être fermé.

c) Si l'intervalle n'est pas borné, par exemple si $I =]1, +\infty[$, la fonction $f(x) = 1/x$ est dans L^p pour tout $p > 1$, mais pas dans $L^1(I)$.

Correction de l'exercice III.12.15 (page 118)

a) On considère la suite de fonctions définie par

$$g_n(x) = |f(x) - T_n \circ f(x)|^p.$$

On a

$$|g_n(x)| \leq |f(x)|^p$$

qui est intégrable. Et $g_n(x)$ converge vers 0 pour presque tout x . On a donc convergence (dominée) de l'intégrale de g vers 0, d'où la convergence en norme L^p de $T_n \circ f$ vers f .

b) On peut considérer de la même manière

$$h_n(x) = |f(x) - \chi_n(x)f(x)|^p.$$

Le même raisonnement assure la convergence vers f de $\chi_n f$ vers f .

c) Le même raisonnement s'applique à $\chi_n T_n \circ f$.

d) Pour $p = +\infty$, $T_n \circ f$ est presque partout égal à f pour n assez grand, on a donc bien convergence en norme L^∞ . Pour $\chi_n f$ en revanche on n'a pas convergence. Pour $f \equiv 1$ par exemple, on a $\|f - \chi_n f\|$ identiquement égal à 1.

Index

- Équipotence, 124
- Équivalence
 - de normes, 21
- Étagée (fonction), 93
- Liminf*, 129
- Limsup, 129

- Absolue continuité, 76
- Accroissements finis (théorème), 42
- Achevée (droite réelle), 13
- Adhérence, 11, 14
- Albedo, 54
- Application
 - bijective, 122
 - continue, 19
 - contractante, 20
 - deux fois différentiable, 58
 - différentiable, 34
 - mesurable, 71
 - surjective, 122
- Axiome du choix, 133

- Banach (espace de), 24, 59, 151
- Banach (espace), 110
- Banach (théorème de point fixe), 20
- Bell (nombre de), 183
- Bijection, 122
- Borel – Lebesgue (propriété), 16
- Borel – Lebesgue (théorème), 18
- Borne
 - inférieure, 124
 - supérieure, 124
- Borélienne (tribu), 69
- Bouts (espace des), 145

- Cantor
 - Processus d'extraction diagonale, 144
 - procédé d'extraction diagonale, 127
- Cartésien (produit), 122
- Cauchy (suite de), 15
- Cellules de Voronoï, 27
- Champ
 - de vecteur, 32
 - scalaire, 32
- Classe
 - monotone, 72

- Compacité, 16
- Compact (espace métrique), 16
- Complet (espace métrique), 15
- Complète (mesure), 76
- Complémentaire, 121
- Composantes connexes, 135
- Conditions
 - aux limites, 12
 - d'interface, 12
- Connexe
 - composante, 135
 - définition (topologie générale), 134
- Connexité, 135
- Continuité, 19
- Continuité (topologie générale), 134
- Contractante (application), 20
- Convergence (d'une suite), 13
- Critique (point), 39

- Densité, 12
- Densité (d'une mesure relativement à une autre), 114
- Différence ensembliste, 122
- Différentielle
 - d'ordre 2, 58
 - de la composée de deux applications, 36
 - définition, 34
- Discret, 7
- Discret (ensemble), 8
- Distance
 - de Hamming, 26
 - de hausdorff, 27
 - ultramétrique, 26
- Divergence, 44
- Droite réelle achevée, 13
- Dual topologique, 24, 59, 151

- Ensemble
 - de mesure pleine, 76
 - de Vitali, 84
 - négligeable, 76
- Ensembles
 - équipotents, 124
- Espace
 - topologique, 134
 - $L^\infty(X)$, 109

- $L^p(X)$, 110
- complet, 15
- de Banach, 24, 59, 110, 151
- des bouts, 145
- mesuré, 74
- métrique compact, 16
- vectorel normé, 8
- Essentiel (sup), 113
- Fatou (lemme), 101
- Fermé, 9
- Finesse (tribus), 68
- Fixe (point), 20
- Flot de gradient, 168
- Fonction
 - indicatrice, 122
 - simple, 93
 - étagée, 93
- Fonctions implicites (théorème), 47
- France (tour de), 42
- Frontière, 11
- Graphe
 - d'une application, 122
 - définition, 124
 - non orienté, 124
 - orienté, 124
- Grossière (topologie), 134
- Hamming (distance de), 26
- Hausdorff (distance), 27
- Heine – Borel (théorème), 18
- histogramme, 95
- Hölder (inégalité), 132
- Image
 - mesure, 88
 - Ttribu, 88
- Image (mesure), 107
- Image (tribu), 70
- Image réciproque, 122
- Indicatrice (fonction), 122
- Infimum, 128
- Intersection, 122
- Intégrale
 - de Lebesgue, 99
 - de Riemann, 41
- Intérieur, 11, 14
- Inversion locale (théorème), 51
- Inégalité
 - de Hölder, 132
 - de Minkowski, 132
- Jacobienne (matrice), 33
- Landau (notation), 34
- landau (notation), 34
- Lebesgue
 - Points de , 114
- Lebesgue (théorème de différentiation), 114
- Lemme
 - de classe monotone, 73
- lemme de Fatou, 101
- Limite inférieure, 129
- Limite supérieure, 129
- Majorant, 124
- Matrice
 - jacobienne, 33
 - symétrique définie positive, 43
- Mesurable (application), 71
- Mesure
 - complète, 76
 - σ – finie, 74
 - définition, 74
 - extérieure, 78
 - finie, 74
 - image, 88, 107
 - pleine (pour les ensembles), 76
 - produit, 103
- Mesuré (espace), 74
- Minkovski (inégalité), 132
- Minorant, 124
- Monotone (classe), 72
- Monotone (théorème de convergence - , 100
- Monotonie (mesure), 75
- Nombre
 - Bell, 183
- Nombres
 - décimaux, 126
 - réels (construction), 126
- Norme
 - $\|\cdot\|_p$, 9
 - définition, 8
 - subordonnée, 22
- Norme équivalente, 21
- Négligeable (ensemble), 76
- Ordre
 - partiel, 123
 - relation, 123
 - total, 123
- Ouvert, 9
- Partie
 - entière, 126
 - dense, 12
- Partition, 122
- Point
 - critique, 39

- stationnaire, 39
- Point
 - d'équilibre, 176
- Point fixe d'une application, 20
- Poupée russe, 142
- Productivité, 117
- Produit
 - cartésien (de deux ensembles), 122
- Produit (mesure), 103
- Propriété de Borel – Lebesgue, 16
- Radon-Nikodym (théorème), 114
- Relation
 - d'ordre, 123
- Russe (poupée), 142
- Réciproque (image), 122
- Régularité (d'une mesure), 85
- Schwarz (théorème), 55
- Section, 102
- Simple (fonction), 93
- Subordonnée (norme), 22
- Suite
 - convergente, 13
 - de Cauchy, 15
 - maximisante, 128
 - minimisante, 128
- Supremum, 128
- Supremum
 - essentiel, 109, 113
- Surjection, 122
- Surjection
 - canonique, 123
 - définition, 122
- Theorème
 - de différentiation de Lebesgue, 114
 - de Radon-Nikodym, 114
- Théorème
 - d'inversion locale, 51
 - de Banach (point fixe), 20
 - de convergence dominée, 101
 - de convergence monotone, 100
 - de Heine – Borel ou Borel – Lebesgue, 18
 - de Schwarz, 55
 - des accroissements finis, 42
 - des fonctions implicites, 47
- Topologie
 - discrète, 134
 - grossière, 134
- Topologie générale, 134
- Totalement discontinu, 135
- Tour (de France), 42
- Tribu
 - borélienne, 69
 - de Lebesgue, 83
 - définition, 68
 - engendrée par un ensemble de parties, 69
 - image, 70, 88
 - produit, 102
- Troncature entière, 126
- Union, 122
- Valuation 2-adique, 141
- Vitali (ensemble), 84
- Voronoi (cellules), 27