

# Calcul Intégral V

STEP, MINES ParisTech\*

8 octobre 2019 (#4dd2afe)

## Table des matières

<b>Misc.</b>	<b>2</b>
<b>Dérivées faibles</b>	<b>2</b>
Dérivée faible . . . . .	2
TODO – extension “p.p.” ? . . . . .	3
TODO – Terminologie . . . . .	3
TODO – Dérivable faiblement implique dérivable pp . . . . .	3
TODO – Exemples . . . . .	3
TODO – Warning . . . . .	3
TODO – Continuité absolue . . . . .	3
TODO – Existence de dérivée faible . . . . .	3
TODO – $R_k$ . . . . .	3
TODO – Dérivation faible et IPP . . . . .	3
<b>Mesures signées</b>	<b>4</b>
Note . . . . .	4
TODO – Mesure signée . . . . .	4
TODO – Mesure positive vers mesure signée . . . . .	4
TODO . . . . .	4
TODO – Convention $\perp$ , absorption inf ou non ? . . . . .	4
TODO – Décomposition de Hahn . . . . .	5
TODO – Variation totale . . . . .	5
TODO – $\sigma$ -additivité . . . . .	5
TODO . . . . .	5
TODO – mesure de Radon (signée) . . . . .	5
TODO – fct localement intégrable . . . . .	5
Dérivée généralisée comme mesure . . . . .	5
TODO – extension “p.p.” ? . . . . .	5
TODO – Fonction de variation localement bornée . . . . .	5
TODO – Existence d’une dérivée comme mesure . . . . .	5

---

\*Ce document est un des produits du projet  **boisgera/CDIS**, initié par la collaboration de (S)ébastien Boisgérault (CAOR), (T)homas Romary et (E)milie Chautru (GEOSCIENCES), (P)auline Bernard (CAS), avec la contribution de Gabriel Stoltz (Ecole des Ponts ParisTech, CERMICS). Il est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons “attribution – pas d’utilisation commerciale – partage dans les mêmes conditions” 4.0 internationale.

TODO – Notation Stieltjes . . . . .	6
TODO – Explication notation, lien Kurzweil-Stieltjes . . . . .	6
TODO – Rk Stieltjes . . . . .	6
TODO – Exemples . . . . .	6
TODO – Carac mesures par les fcts test (Riesz) . . . . .	6
TODO – Formule des sauts . . . . .	6
<b>Distributions</b>	<b>6</b>
TODO – Distribution . . . . .	6
TODO – Mesure signée est une distribution . . . . .	6
TODO – Dérivée d’une distribution . . . . .	6
<b>Proba / Fct répartition</b>	<b>6</b>
<b>Probab <math>\Omega \neq \mathbb{R}^n</math></b>	<b>7</b>
<b>Exercices</b>	<b>7</b>
Fonctions lipschitzienne . . . . .	7
Fonctions convexes . . . . .	7
Fonction distance . . . . .	7
<b>Références</b>	<b>7</b>

## Misc.

— fcts définies dans  $\mathbb{R}$ , au moins dans un premier temps

## Dérivées faibles

**Motivation:** étendre la notion de dérivation pour traiter des usages comme les équations différentielles avec second membre discontinu en  $t$ , sans “bricolage” (qui serait: résoudre portion par portion et recoller par continuité, si l’on suppose que l’on est  $C^1$  par morceaux). Motivation analogue pour les probas: variable aléatoire à densité uniforme sur  $[0, 1]$ :  $p$  n’est pas (partout) la dérivée de  $F$ .

Dans les deux cas néanmoins, on a le même schéma ou la “dérivée” permet d’obtenir la fct originale par intégration. (pour les ODEs, pour travailler sur  $\mathbb{R}$ , prolonger rhs par 0 pour  $t \neq 0$  et  $x(t)$  par  $x_0$ .)

Idée: dérivation initialement source de définition de l’intégrale (de Newton); l’intégration est une opération inverse, mais sait aussi intégrer des fonctions qui ne sont *pas* des dérivées (exemple). On peut retourner le problème et définir une nouvelle notion, généralisée de dérivée, à partir de l’intégrale.

### Dérivée faible

La fonction  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  est *faiblement dérivable*, de dérivée (faible) la fonction localement intégrable  $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  s’il existe une constante  $c$  telle que pour tout

$x \in \mathbb{R}$ ,

$$f(x) = c + \int_0^x g(t) dt.$$

### **TODO – extension “p.p.” ?**

Aka fct de départ définie pp ? Bof ... Mmm quand même nécessaire pour la suite.

### **TODO – Terminologie**

Opter pour “généralisée” en 1ere instance ? dérivée généralisée, dérivable au sens des distributions (cf. + tard)

### **TODO – Dérivable faiblement implique dérivable pp**

Corollaire: dérivable faiblement implique dérivée classique existe pp et est égale à la dérivée faible

### **TODO – Exemples**

$x \mapsto |x|$  ?

### **TODO – Warning**

attention: dérivée classique définie pp suffit pas à avoir dérivée faible (ex: fct de Heaviside). Dérivée faible implique dérivée pp, réciproque pas vraie, même si on ajoute continue (idée qui vient naturellement quand on construit un contre-exemple). Exemple avec ensembles de Cantor / devil’s staircase.

### **TODO – Continuité absolue**

### **TODO – Existence de dérivée faible**

(équiv abs. cont. si dérivée faible est localement absolument intégrable)

### **TODO – Rk**

On peut ne pas se limiter au dérivée loclt abs cont, mais alors la classe des fcts est  $AC^*$  ... Grpmh.

### **TODO – Dérivation faible et IPP**

(équivalence)

## Mesures signées

Aka section “dérivée est une mesure”

### Note

Sauf erreur, la définition “naturelle” (ressemblant) de mesure à valeurs dans  $\mathbb{R}$  ne garantit pas l’existence d’une décomposition de Hahn et ne permet donc pas de se ramener au cas des mesures positives (cf. Dunford-Schwarz pour la preuve de ce résultat). Cela a donc du sens d’insister sur une définition de mesure signée, prenant comme base une mesure et une fonction de signe. (à plus long-terme, j’aimerais un exemple de mesure à valeurs réelles qui n’admet pas de décomposition de Hahn)

### TODO – Mesure signée

Une *mesure signée*  $\nu$  sur la tribu  $\mathcal{A}$  de  $X$  est une application de  $\mathcal{A}$  dans  $\mathbb{R} \cup \{\perp\}$  pour laquelle il existe une mesure positive  $\mu$  sur  $\mathcal{A}$  et une application  $\mu$ -mesurable  $\nu : X \rightarrow \{-1, +1\}$  telles que

$$\nu(A) := \sigma\mu(A) := \int_A \sigma(x) \mu(dx)$$

si l’application  $1_A \times \sigma$  est  $\mu$ -intégrable et  $\nu(A) = \perp$  sinon.

### TODO – Mesure positive vers mesure signée

“Conversion” de inf vers  $\perp$ .

### TODO

Comment on a défini  $\mu$ -intégrable dans le chapitre précédent ? Précisément, est-ce qu’une intégrale avec “une valeur infinie” est intégrable ? Le “problème”, outre l’absence de cohérence par rapport aux chapitres précédents, est qu’on peut alors avoir une fonction intégrable, et la rendre non-intégrable en la multipliant par une fonction de signe mesurable. OK, bon, intégrable veut dire intégrale finie, le cas  $+\infty$  sera à décrire comme une extension dans les cas simples (comme fct mesurable positive non intégrable par exemple).

### TODO – Convention $\perp$ , absorption inf ou non ?

Disons pas d’absorption par défaut ? À voir, y réfléchir. Avec absorption c’est plus simple quand même ...

## TODO – Décomposition de Hahn

(trivial, mais bon)

## TODO – Variation totale

## TODO – $\sigma$ -additivité

## TODO

$f$   $\mu$ -intégrable à valeurs réelles fois  $\mu$  défini une mesure signée

## TODO – mesure de Radon (signée)

— lien avec

## TODO – fct localement intégrable

... définie (“est”) une mesure de Radon. Et la mesure détermine

## Dérivée généralisée comme mesure

La fonction  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  admet comme *dérivée généralisée* la mesure de Radon  $\mu$  sur  $\mathbb{R}$  s’il existe une constante  $c$  telle que pour tout  $x \in \mathbb{R}$ ,

$$f(x) = c + \int_0^x d\mu(t).$$

\$\$

## TODO – extension “p.p.” ?

Aka fct de départ définie pp ? Là peut-être plus légitime que pour les fcts, sinon quand il y a un saut, la fct de départ est tjs continue à gauche ? Grpmh la déf est peut-être pas terrible. On ferait mieux d’intégrer sur  $[0, x[$  (ne serait-ce que pour avoir la “bonne” constante en 0, et l’additivité) ; nécessaire alors de définir ça comme ça dans la section sur la théorie de la mesure. Nota: pas évident, les probabilités avec la convention de la fonction de répartition suggère plutôt d’interpréter  $\int_a^b$  comme l’intégrale sur  $]a, b]$  (si l’on veut garder l’additivité).

## TODO – Fonction de variation localement bornée

## TODO – Existence d’une dérivée comme mesure

Fct de variation localement bornée iff dérivée est une mesure de Radon

## **TODO – Notation Stieltjes**

(explication en définissant explicitement la mesure associée à la fct de variation bornées)

## **TODO – Explication notation, lien Kurzweil-Stieltjes**

(en gros: bien que la valeur des intégrales soit différentes – et l'explication n'est pas si dure, L-S ignore les valeurs de la fct à la discontinuité, pas K-S – intégrable au sens de L-S implique intégrabilité au sens de K-S, cf. Milan, Antunes, and Antonin (2018))

## **TODO – Rk Stieltjes**

Si on intègre des fcts continues, la notation prend du sens.

## **TODO – Exemples**

- Equa diff encore, mais en prologeant  $x(t)$  par 0 pour  $t \neq 0$
- Proba et fct de répartition arbitraire.

## **TODO – Carac mesures par les fcts test (Riesz)**

Aka mesure de Radon défini des opérateurs continus de  $C_0^0([a, b])$  dans  $\mathbb{R}$  et l'inverse aussi (si prolongements compatibles).

## **TODO – Formule des sauts**

# **Distributions**

## **TODO – Distribution**

distribution d'ordre  $k$  uniquement. Fonctionnelle définie sur les fcts  $C^k$  telle que si  $C_0^k([a, b])$  désigne les fcts nulles que leurs dérivée au bord, alors (restriction de  $T$ ) linéaire bornée de  $C_0^k([a, b])$  dans  $\mathbb{R}$ .

## **TODO – Mesure signée est une distribution**

## **TODO – Dérivée d'une distribution**

# **Proba / Fct répartition**

Généralisation cas discret et à densité; dans les deux cas, fcts croissante  $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , nulle en  $-\infty$ , de variation 1, etc.

Montrer comment définir une mesure (extérieure) associée, notation  $\mu(= df)$  (Lebesgue-Stieltjes) ?

Lien notation avec somme de Riemman-Stieltjes pour l'intégration de fcts continues ?

**Probab**  $\Omega \neq \mathbb{R}^n$

## Exercices

### Fonctions lipschitzienne

(d'une variable). Montrer qu'elles ont une dérivée faible (et donc pp), en utilisant leur caractère absolument continu (cf. Evans-Gariepy dans le cas multivariable) et que la dérivée (faible) est de norme plus petite que la constante de Lipschitz.

### Fonctions convexes

Equivalent dérivée seconde est une mesure positive ?

### Fonction distance

Dérivées seconde fonction distance, squelette, courbure, etc ?

## Références

Milan, T., M.G. Antunes, and S. Antonin. 2018. *Kurzweil-Stieltjes Integral: Theory and Applications*. Series in Real Analysis. World Scientific Publishing Company.