

# 8 | Dérivabilité et convexité

## I – Dérivée en un point

### 1 – Nombre dérivé

**Définition 8.1** – Soit  $f$  une fonction définie sur intervalle  $I$  et soit  $x_0 \in I$ . La fonction  $f$  est dite **dérivable en**  $x_0$  si le taux d'accroissement  $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$  admet une limite finie quand  $x$  tend vers  $x_0$ . Cette limite est alors appelée **nombre dérivé** de  $f$  en  $x_0$  et est notée  $f'(x_0)$ .

$$f'(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}.$$

#### Exemple 8.2 –

- La fonction  $f$  définie sur  $\mathbf{R}$  par  $f(x) = x^2$  est dérivable en 1.
- Plus généralement, la fonction  $f$  est dérivable en tout  $x_0 \in \mathbf{R}$ .
- La fonction  $f$  définie sur  $\mathbf{R}^*$  par  $f(x) = \frac{1}{x}$  est dérivable en tout  $x_0 \in \mathbf{R}^*$ .

#### Remarque 8.3 –

- En posant  $h = x - x_0$ , et sous réserve d'existence, on a également

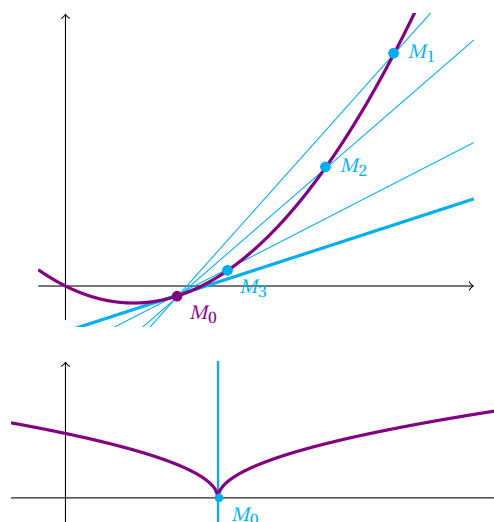
$$f'(x_0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h}.$$

- En pratique, on utilise la définition seulement pour montrer la dérivabilité aux "points à problèmes". En dehors de ces points, on justifie la dérivabilité à l'aide des propriétés de la Section II.

### 2 – Interprétation géométrique

Soit  $f$  une fonction définie sur un intervalle  $I$  et soit  $x_0 \in I$ . Notons  $M_0$  le point de coordonnées  $(x_0, f(x_0))$  et  $M$  le point de coordonnées  $(x, f(x))$  pour  $x \in I$ . Le taux d'accroissement  $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$  correspond au coefficient directeur de la droite  $(MM_0)$ .

- Si  $f$  est dérivable en  $x_0$ , alors ce coefficient directeur tend vers  $f'(x_0)$  lorsque  $x$  tend vers  $x_0$ . Par ailleurs, la droite  $(M_0M)$  tend vers une position limite qui est la tangente à la courbe représentative de  $f$  au point  $x_0$ . Le nombre dérivé  $f'(x_0)$  est alors le coefficient directeur de la tangente à la courbe  $f$  au point  $M_0$ .
- Si la limite du taux d'accroissement est infinie, alors la courbe représentative de  $f$  possède en  $x_0$  une tangente verticale d'équation  $x = x_0$ .



On résume cela dans la proposition suivante.

#### Proposition 8.4

Soit  $f$  une fonction définie sur un intervalle  $I$  et soit  $x_0 \in I$ .

- Si  $f$  est dérivable en  $x_0$ , alors  $f'(x_0)$  est le coefficient directeur de la tangente à la courbe représentative  $\mathcal{C}_f$  de  $f$  au point d'abscisse  $x_0$ . L'équation de cette tangente est

$$y = f'(x_0)(x - x_0) + f(x_0).$$

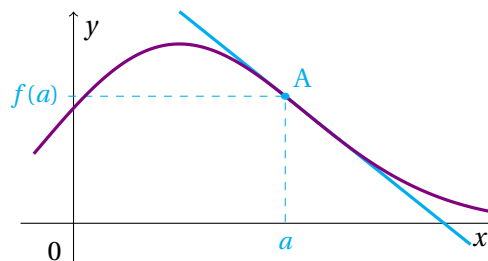
- Si  $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = \pm\infty$ , alors  $f$  n'est pas dérivable en  $x_0$  et la courbe  $\mathcal{C}_f$  admet une tangente verticale au point d'abscisse  $x_0$ .

#### Exemple 8.5 –

- Puisque la fonction  $f$  définie sur  $\mathbf{R}$  par  $f(x) = x^2$  est dérivable en  $x_0 = 1$  de dérivée  $f'(1) = 2$ , la courbe représentative de  $f$  admet au point  $M_0$  de coordonnées  $(1; 1)$  une tangente d'équation
- Au contraire, la fonction définie sur  $\mathbf{R}$  par  $f(x) = \sqrt{|x|}$  n'est pas dérivable en 0 et la courbe représentative de  $f$  admet une tangente verticale au point  $(0; 0)$ .

### 3 – Approximation affine

Soit  $f$  une fonction définie sur un intervalle  $I$ , dérivable en  $a$  et  $\mathcal{C}_f$  sa courbe représentative. Au voisinage de  $a$ , la tangente en  $a$  ressemble beaucoup à la courbe  $\mathcal{C}_f$ , on dit que la tangente est une **approximation affine** de la courbe  $\mathcal{C}_f$  au voisinage du point d'abscisse  $a$ .



#### Théorème 8.6

Soit  $f$  une fonction définie sur un intervalle  $I$  et soit  $a \in I$ . On suppose que  $f$  est dérivable en  $a$ . Alors pour  $h$  proche de 0, on a

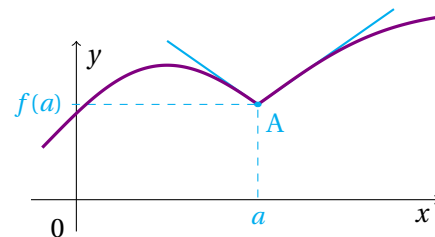
$$f(a + h) \approx f(a) + hf'(a).$$

**Exemple 8.7** – Calculer une valeur approchée de  $\sqrt{1.02}$ .

**Corollaire 8.8**

Soit  $f$  une fonction définie sur un intervalle  $I$  et soit  $x_0 \in I$ . Si  $f$  est dérivable en  $x_0$ , alors  $f$  est continue en  $x_0$ .

**Remarque 8.9** – Une fonction peut être continue en un point sans être dérivable en ce point. Par exemple, la courbe ci-contre admet des demi-tangentes à gauche et à droite en  $a$ , mais pas de tangente en  $a$ .



#### 4 – Nombre dérivé à droite et à gauche

**Définition 8.10** – Soit  $f$  une fonction définie sur un intervalle  $I$  et soit  $x_0 \in I$ .

La fonction  $f$  est dite **dérivable à droite** en  $x_0$  si le taux d'accroissement  $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$  admet une limite finie quand  $x$  tend vers  $x_0^+$ . Dans ce cas, cette limite est appelée **nombre dérivé à droite** de  $f$  en  $x_0$ , et est notée  $f'_d(x_0)$ .

$$f'_d(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0^+} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}.$$

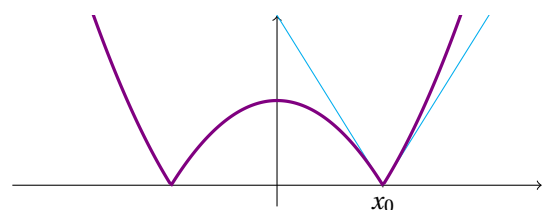
De même,  $f$  est dite **dérivable à gauche** en  $x_0$  si le taux d'accroissement  $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$  admet une limite finie quand  $x$  tend vers  $x_0^-$ . Dans ce cas, cette limite est appelée **nombre dérivé à gauche** de  $f$  en  $x_0$ , et est notée  $f'_g(x_0)$ .

$$f'_g(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0^-} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}.$$

**Proposition 8.11**

Soit  $f$  une fonction définie sur un intervalle  $I$  et soit  $x_0 \in I$ . Alors la fonction  $f$  est dérivable en  $x_0$  si et seulement si  $f$  est dérivable à gauche et à droite en  $x_0$  **ET** que  $f'_d(x_0) = f'_g(x_0)$ . Dans ce cas, on a  $f'_g(x_0) = f'(x_0) = f'_d(x_0)$ .

La fonction  $f$  dont la courbe est donnée ci-contre est dérivable à gauche et à droite en  $x_0$ , mais pas en  $x_0$  car  $f'_g(x_0) \neq f'_d(x_0)$ .



## II – Fonction dérivée

**Définition 8.12** – Soit  $f$  une fonction définie sur un intervalle  $I$ . On dit que  $f$  est **dérivable sur  $I$** , si  $f$  est dérivable en tout point  $x \in I$ . La fonction  $f' : \begin{matrix} I & \rightarrow & \mathbf{R} \\ x & \mapsto & f'(x) \end{matrix}$  est appelée la **fonction dérivée** de la fonction  $f$ .

**Exemple 8.13** –

- La fonction carrée est dérivable sur  $\mathbf{R}$ .
- La fonction inverse est dérivable sur  $\mathbf{R}^*$ .
- La fonction  $\ln$  est dérivable sur  $]0; +\infty[$ .

### 1 – Dérivée des fonctions usuelles

Le tableau suivant indique les dérivées des fonctions usuelles.

$f$ est définie sur	$f(x)$	$f'(x)$	$f$ est dérivable sur
$\mathbf{R}$	$k$	$0$	$\mathbf{R}$
$\mathbf{R}$	$x$	$1$	$\mathbf{R}$
$\mathbf{R}$	$x^n$	$nx^{n-1}$	$\mathbf{R}$ pour $n$ entier $n \geq 2$
$\mathbf{R}^*$	$\frac{1}{x}$	$-\frac{1}{x^2}$	$\mathbf{R}^*$
$\mathbf{R}^*$	$\frac{1}{x^n}$	$-\frac{n}{x^{n+1}}$	$\mathbf{R}^*$ pour $n$ entier $n \geq 1$
$]0; +\infty[$	$\sqrt{x}$	$\frac{1}{2\sqrt{x}}$	$]0; +\infty[$

### 2 – Opérations sur les fonctions dérivables

Soient  $u$  et  $v$  deux fonctions dérivables sur un intervalle  $I$ .

Opération	Dérivée
Somme	$(u + v)' = u' + v'$
Multiplication par une constante $k$	$(ku)' = k \times u'$
Produit	$(uv)' = u'v + uv'$
Quotient	$\left(\frac{u}{v}\right)' = \frac{u'v - uv'}{v^2}$
Composition	$(v \circ u)' = u' \times (v' \circ u)$

**Remarque 8.14** – La formule de dérivation de la composition de deux fonctions permet de déterminer de nombreuses formules de dérivations.

Fonction	Dérivée
$u^n$ pour $n > 0$	$(u^n)' = nu'u^{n-1}$
$\sqrt{u}$	$(\sqrt{u})' = \frac{u'}{2\sqrt{u}}$
$\frac{1}{u}$	$\left(\frac{1}{u}\right)' = -\frac{u'}{u^2}$

**Exemple 8.15** – Calculer les dérivées des fonctions suivantes.

- $f(x) = 2x^2 - x + 5$

- $g(x) = (x + 3)\sqrt{x}$

- $h(x) = \frac{2x - 5}{x^2 + 3}$

- $i(x) = x\sqrt{x} - x$

- $j(x) = \sqrt{x^2 + 1}$

- $k(x) = \frac{1}{2x^2 + 3}$

**Proposition 8.16**

- Une fonction polynomiale est dérivable sur  $\mathbf{R}$ .
- Une fraction rationnelle est dérivable sur son ensemble de définition.

**3 – Dérivées successives**

**Exemple 8.17** – Soit  $f$  la fonction définie sur  $\mathbf{R}$  par  $f(x) = x^3 - 3x^2 + 5x + 1$ .

La fonction  $f$  est dérivable et

La fonction  $f'$  est dérivable et

La fonction  $f''$  est dérivable et

**Définition 8.18** – Soit  $f$  une fonction définie sur un intervalle  $I$ .

- On dit que  $f$  est **deux fois dérivable** si  $f$  et  $f'$  sont dérivables. Dans ce cas, on note  $f''$  ou  $f^{(2)}$  la dérivée de  $f'$ .
- Plus généralement, on dit que  $f$  est  **$n$  fois dérivable** ( $n \geq 1$ ) si, pour tout entier  $1 \leq p \leq n-1$ ,  $f^{(p)}$  est dérivable. On note alors  $f^{(n)} = (f^{(n-1)})'$ .



**ATTENTION !** La notation  $f^{(p)}$  n'a rien à voir avec la notion de puissance !

**Exemple 8.19** – Soit  $f$  la fonction définie sur  $\mathbf{R} \setminus \{1\}$  par  $f(x) = \frac{1}{1-x}$ . Alors pour tout  $x \in \mathbf{R} \setminus \{1\}$ ,

**III – Application à l'étude des variations d'une fonction****1 – Monotonie et signe de la dérivée****Théorème 8.20**

Soit  $f$  une fonction définie et dérivable sur un intervalle  $I$ . Alors

$$f \text{ est constante sur } I \iff \forall x \in I, \quad f'(x) = 0.$$



**ATTENTION !** Le résultat est faux si  $I$  n'est pas un intervalle. Ainsi la fonction définie sur  $\mathbf{R}^*$  par  $f(x) = -1$  si  $x < 0$  et  $f(x) = 1$  si  $x > 0$ , vérifie  $f'(x) = 0$  pour tout  $x \in \mathbf{R}^*$ , mais  $f$  n'est pas constante.

**Théorème 8.21**

Soit  $f$  une fonction définie et dérivable sur un intervalle  $I$ . Alors

- $f$  est croissante (resp. décroissante) sur  $I$  si et seulement si  $f'(x) \geq 0$  (resp.  $f'(x) \leq 0$ ) pour tout  $x \in I$ .
- $f$  est strictement croissante (resp. strictement décroissante) sur  $I$  si et seulement si  $f'$  est strictement positive (resp. strictement négative) sur  $I$  **sauf éventuellement en un nombre fini de points** où  $f'$  peut s'annuler.

**Exemple 8.22** – On considère la fonction  $f$  définie sur  $\mathbf{R}$  par  $f(x) = x^3$ .

**Méthode 8.23 – Étudier les variations d'une fonction**

1. On justifie que la fonction est bien dérivable.
2. On calcule la dérivée de la fonction.
3. On détermine le signe de la dérivée.
4. On en déduit les variations de la fonction.

**Exemple 8.24** – Soit  $f$  la fonction définie sur  $\mathbf{R}$  par  $f(x) = 2x^3 - 15x^2 + 36x + 7$ . Étudier les variations de la fonction  $f$ .

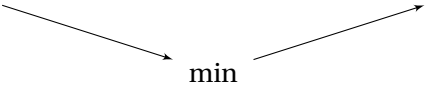
## 2 – Extrema locaux

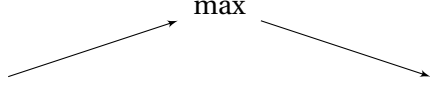
On rappelle qu'un extremum est un maximum ou un minimum.

### Théorème 8.25

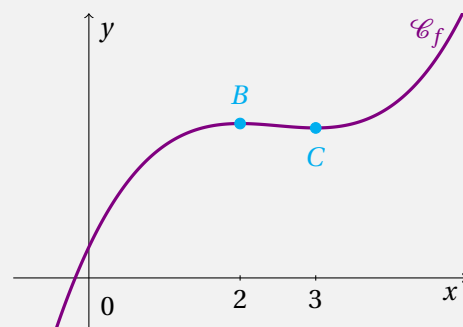
Soit  $f$  une fonction dérivable sur un intervalle  $I$  de  $\mathbf{R}$  et  $x_0$  un réel appartenant à  $I$ .

1. Si  $f$  admet un extremum local en  $x_0$ , alors  $f'(x_0) = 0$ .
2. Si la dérivée  $f'$  s'annule en  $x_0$  **en changeant de signe**, alors  $f$  admet un extremum local en  $x_0$ .

$x$	$a$	$x_0$	$b$
$f'(x)$	–	0	+
$f$			

$x$	$a$	$x_0$	$b$
$f'(x)$	+	0	–
$f$			

**Exemple 8.26** – Reprenons l'exemple de la fonction définie sur  $\mathbf{R}$  par  $f(x) = 2x^3 - 15x^2 + 36x + 7$ .





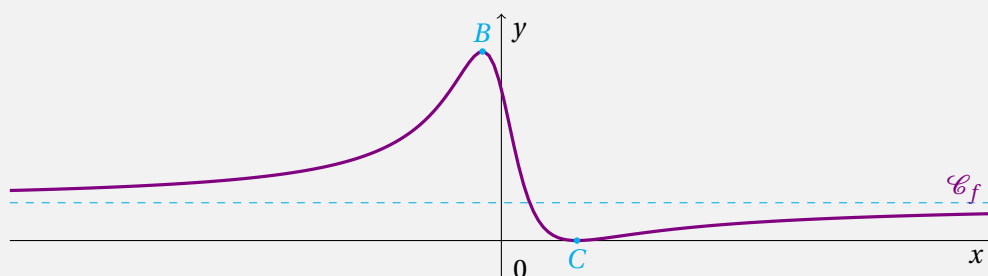
### 3– Exemple : étude d'une fonction

**Exemple 8.27** – Soit  $f$  la fonction définie sur  $\mathbf{R}$  par  $f(x) = 1 - \frac{4x-3}{x^2+1}$ .

1. Calculer  $f'(x)$ .

2. Étudier les variations de la fonction  $f$ .

3. Tracer l'allure de la courbe représentative de  $f$ .

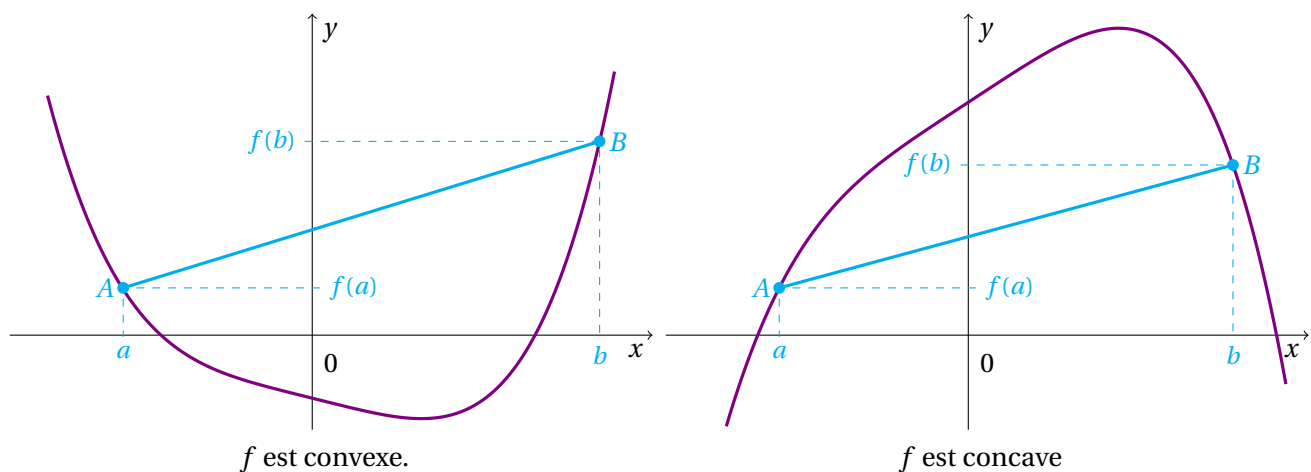


## IV – Convexité

### 1 – Définition

**Définition 8.28** – Soit  $f$  une fonction dérivable sur un intervalle  $I$  et  $\mathcal{C}_f$  sa courbe représentative.

- Dire que la fonction  $f$  est **convexe** sur  $I$  signifie que la courbe  $\mathcal{C}_f$  est située **au-dessous de chacune de ses cordes**.
- Dire que la fonction  $f$  est **concave** sur  $I$  signifie que la courbe  $\mathcal{C}_f$  est située **au-dessus de chacune de ses cordes**.

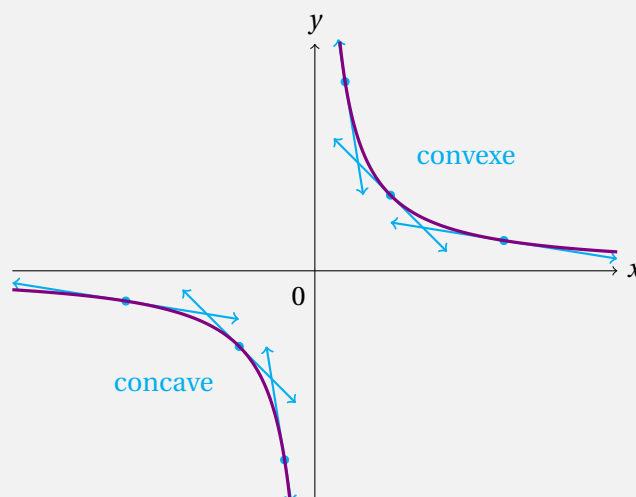


### Théorème 8.29

Soit  $f$  une fonction dérivable sur un intervalle  $I$ . Alors

- $f$  est **convexe** sur  $I$  si et seulement si sa courbe est située entièrement **au-dessus de chacune de ses tangentes**.
- $f$  est **concave** sur  $I$  si et seulement si sa courbe est située entièrement **au-dessous de chacune de ses tangentes**.

**Exemple 8.30** – La fonction inverse  $x \mapsto \frac{1}{x}$  est concave sur  $] -\infty; 0[$  et convexe sur  $]0; +\infty[$ .



## 2– Dérivation et convexité

### Théorème 8.31

Soit  $f$  une fonction deux fois dérivable sur un intervalle  $I$ . Alors

- $f$  est **convexe** sur  $I$  si et seulement si pour tout  $x \in I$ ,  $f''(x) \geq 0$ .
- $f$  est **concave** sur  $I$  si et seulement si pour tout  $x \in I$ ,  $f''(x) \leq 0$ .

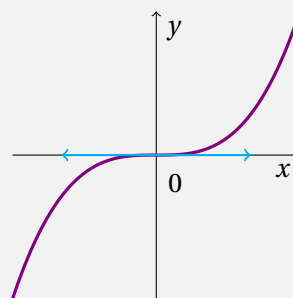
**Exemple 8.32** – Soit  $f$  la fonction définie sur  $\mathbf{R}$  par  $f(x) = x^5 - 5x^4$ .

## 3– Point d'inflexion

**Définition 8.33** – Soit  $f$  une fonction et  $\mathcal{C}_f$  sa courbe représentative. Un **point d'inflexion** de la courbe  $\mathcal{C}_f$  est un point où la courbe  $\mathcal{C}_f$  traverse sa tangente en ce point. C'est aussi le point où la convexité change de sens.

**Exemple 8.34** – La courbe représentative de la fonction cube définie sur  $\mathbf{R}$  par  $f(x) = x^3$  admet comme point d'inflexion l'origine (le point de coordonnées  $(0;0)$ ) du repère.

La courbe  $\mathcal{C}_f$  traverse sa tangente en  $O$  donc  $(0;0)$  est un point d'inflexion.



### Théorème 8.35

Soit  $f$  une fonction deux fois dérivable sur un intervalle  $I$  et soit  $x_0 \in I$ . Le point  $M_0(x_0, f(x_0))$  est un point d'inflexion de la courbe  $\mathcal{C}_f$  si et seulement si  $f''$  s'annule en changeant de signe en  $x_0$ .

**Exemple 8.36** – Soit  $f$  la fonction définie sur  $\mathbf{R}$  par  $f(x) = x^5 - 5x^4 - 40x + 120$  et  $\mathcal{C}_f$  sa courbe.

