LA FONCTION EXPONENTIELLE

I Introduction

Nous allons tenter de résoudre une équation fonctionnelle, c'est à dire que l'on cherche toutes les fonctions vérifiant une condition donnée. On cherche les fonctions f définies sur $\mathbb{R}$ qui vérifient la propriété suivante :

La condition

$$\begin{cases} \forall x \in \mathbb{R} \text{ , } f'(x) = f(x) \\ f(0) = 1 \end{cases}$$

En français, on cherche les fonctions qui sont égales à leur dérivée et pour lesquelles l'image de 0 vaut 1 .

Propriété n°1. ***Si une telle fonction existe alors elle ne s'annule pas***

Si f est une fonction, définie sur $\mathbb{R}$, vérifiant :

$$\begin{cases} \forall x \in \mathbb{R} \text{ , } f'(x) = f(x) \\ f(0) = 1 \end{cases} \quad \text{alors} \quad \forall x \in \mathbb{R} \text{ , } f(x) \neq 0$$

preuve :

▪ Soit f une telle fonction. Construisons la fonction h définie également sur $\mathbb{R}$ par : $\forall x \in \mathbb{R}$, $h(x) = f(x) \times f(-x)$

▪ Montrons que h est dérivable sur $\mathbb{R}$:

$x \mapsto -x$ et f sont dérivables sur $\mathbb{R}$ dont leur composée $g : x \mapsto f(-x)$ l'est aussi.

h étant le produit de deux fonctions dérivables sur $\mathbb{R}$, elle est dérivable sur $\mathbb{R}$.

▪ Montrons que h' est nulle :

On peut écrire que $h = f \times g$ et donc $h' = f' \times g + f \times g'$.

C'est à dire que

$$\begin{aligned} &\forall x \in \mathbb{R} \\ &h'(x) = f'(x)g(x) + f(x)g'(x) \\ & = f'(x)f(-x) - f(x)f'(-x) && \text{(car } g'(x) = -f'(-x)\text{)} \\ & = f(x)f(-x) - f(x)f(-x) && \text{(car } f' = f \text{)} \\ & = 0 \end{aligned}$$

▪ Montrons que h est constante égale à 1 .

La dérivée de h est nulle sur l'intervalle $\mathbb{R}$ donc h est constante sur $\mathbb{R}$.

De plus $h(0) = f(0) \times f(0) = 1 \times 1 = 1$

Donc $\forall x \in \mathbb{R}$, $h(x) = 1$

▪ Montrons que f ne s'annule pas sur $\mathbb{R}$.

S'il existait $x \in \mathbb{R}$ tel que $f(x) = 0$, alors on aurait $h(x) = 0$ ce qui est impossible.

Propriété n°2. ***Si une telle fonction existe alors elle est unique***

Si f est une fonction, définie sur $\mathbb{R}$, vérifiant :
$\begin{cases} \forall x \in \mathbb{R}, f'(x) = f(x) \\ f(0) = 1 \end{cases}$ alors f est unique.

preuve :

▪ Soit f et g deux fonctions vérifiant la condition. Nous allons montrer qu'alors $f = g$.

▪ Soit h la fonction définie sur $\mathbb{R}$ par $\forall x \in \mathbb{R}, h(x) = \dfrac{f(x)}{g(x)}$.

(h est bien définie car g ne s'annule pas d'après la propriété n°1)

▪ Montrons que h' est nulle :

f et g étant des fonctions dérivables sur $\mathbb{R}$ qui ne s'annulent pas, leur quotient $h = \dfrac{f}{g}$ est également dérivable sur $\mathbb{R}$ et,

$\forall x \in \mathbb{R}$,

$$\begin{aligned} h'(x) &= \frac{f'(x)g(x) - f(x)g'(x)}{(g(x))^2} \\ &= \frac{f(x)g(x) - f(x)g(x)}{(g(x))^2} \quad \text{(car } f \text{ et } g \text{ vérifient la condition)} \\ &= 0 \end{aligned}$$

▪ Montrons que h est constante, égale à 1.

La dérivée de h est nulle sur l'intervalle $\mathbb{R}$ donc h est constante.

De plus $h(0) = \dfrac{f(0)}{g(0)} = \dfrac{1}{1} = 1$

Donc $\forall x \in \mathbb{R}, h(x) = 1$.

▪ Montrons que $f = g$

$\forall x \in \mathbb{R}, h(x) = 1$

Or, $h(x) = \dfrac{f(x)}{g(x)}$

Donc $f(x) = g(x)$

Remarque n°1. ***Une telle fonction existe bien et nous allons l'étudier.***

La preuve est admise en première mais nous en verrons une idée…

II La fonction Exponentielle et quelques-unes de ses propriétés

Définition n°1.

On appelle fonction Exponentielle et on note $\exp$ l'unique fonction définie sur $\mathbb{R}$, vérifiant :

$$\boxed{\begin{cases} \forall x \in \mathbb{R}\ ,\ \exp'(x) = \exp(x) \\ \exp(0) = 1 \end{cases}}$$

Propriété n°3. ***La fonction exp ne n'annule pas***

$$\boxed{\forall x \in \mathbb{R}\ ,\ \exp(x) \neq 0}$$

preuve :

Faite en introduction

Propriété n°4. ***L'exponentielle de la somme égale le produit des exponentielles***

Soit a et b deux nombres réels, alors :

$$\boxed{\exp(a+b) = \exp(a) \times \exp(b)}$$

preuve :

Soit $b \in \mathbb{R}$, et $f : \begin{cases} \mathbb{R} \to \mathbb{R} \\ x \mapsto \dfrac{1}{\exp(b)} \times \exp(x+b) \end{cases}$

▪ Montrons que f est dérivable sur $\mathbb{R}$

Les fonctions $\exp$ et $x \mapsto x+b$ sont dérivables sur $\mathbb{R}$ donc leur composée aussi. f est ainsi dérivable sur $\mathbb{R}$.

▪ Montrons que $f' = f$

Soit $x \in \mathbb{R}$

$$f'(x) = \frac{1}{\exp(b)} \times \exp'(x+b) = \frac{1}{\exp(b)} \times \exp(x+b) = f(x)$$

▪ Montrons que $f(0) = 1$

$$f(0) = \frac{1}{\exp(b)} \times \exp(0+b) = \frac{\exp(b)}{\exp(b)} = 1$$

▪ Utilisons l'unicité de la fonction exponentielle pour montrer que $f = \exp$.

La fonction f vérifie la condition $\begin{cases} \forall x \in \mathbb{R}\ ,\ f'(x) = f(x) \\ f(0) = 1 \end{cases}$

c'est donc la fonction exp.

Ainsi $\forall x \in \mathbb{R}, \dfrac{1}{\exp(b)} \times \exp(x+b) = \exp(x)$

ce qui s'écrit encore :

$\forall x \in \mathbb{R}, \exp(x+b) = \exp(x) \times \exp(b)$ *cqfd*

Propriété n°5. ***l'inverse de l'exponentielle égale l'exponentielle de l'opposé***

$$\boxed{\forall x \in \mathbb{R}, \frac{1}{\exp(x)} = \exp(-x)}$$

preuve :

Soit $x \in \mathbb{R}$,

$1 = \exp(0) = \exp(x-x) = \exp(x) \times \exp(-x)$

puis en divisant chaque membre par le nombre $\exp(x)$ qui est non nul :

$\exp(-x) = \dfrac{1}{\exp(x)}$ *cqfd*

Propriété n°6. ***La fonction exp est strictement positive sur*** $\mathbb{R}$

$$\boxed{\forall x \in \mathbb{R}\ ,\ \exp(x) > 0}$$

preuve :

Soit $x \in \mathbb{R}$,

$$\exp(x) = \exp\left(\frac{x}{2}+\frac{x}{2}\right) = \exp\left(\frac{x}{2}\right)\times\exp\left(\frac{x}{2}\right) = \left(\exp\left(\frac{x}{2}\right)\right)^2 > 0$$

Propriété n°7. ***La fonction exp et ses puissances n^{ième}***

$\forall n \in \mathbb{N}, \forall a \in \mathbb{R},$

$$\boxed{(\exp(a))^n = \exp(n a)}$$

preuve :

▪ Soit $a \in \mathbb{R}$, et soit la suite $(u_n)_{n\in\mathbb{N}}$ définie par :
$\forall n \in \mathbb{N}\ ,\ u_n = \exp(na)$.

▪ On a :
$u_0 = \exp(0\times a) = 1$

▪ Et pour tout entier naturel n ,
$u_{n+1} = \exp((n+1)a) = \exp(na+a) = \exp(na)\exp(a) = u_n\times\exp(a)$

▪ On reconnaît une suite suite géométrique de premier terme $u_0 = 1$ et de raison $q = \exp(a)$.

▪ Donc :
$\forall n \in \mathbb{N}\ ,\ u_n = u_0\times q^n = 1\times(\exp(a))^n$

En identifiant terme à terme, on obtient le résultat. *cqfd.*

III Le comportement de la fonction exponentielle.

Propriété n°8. ***La fonction exp est strictement croissante sur*** $\mathbb{R}$

La fonction exp est strictement croissante sur $\mathbb{R}$.
autrement dit :
Pour tous nombres réels a et b : $\boxed{a < b \Leftrightarrow \exp(a) < \exp(b)}$

preuve :

$\forall x \in \mathbb{R}\ ,\ \exp'(x) = \exp(x) > 0$ (d'après la propriété n°6)
La dérivée de la fonction exponentielle est strictement positive sur l'intervalle $\mathbb{R}$ donc la fonction exponentielle est strictement croissante sur l'intervalle $\mathbb{R}$.

Remarque n°2.

La fonction exponentielle conserve donc les inégalités, ce qui signifie que l'on peut remplacer « $<$ » par « $>$, $\leqslant$ ou $\geqslant$ ».
Cela sera utile pour les inéquations.

Remarque n°3.

La propriété n°8, nous permet d'affirmer que si un nombre admet un antécédent par la fonction exp alors cet antécédent est unique. C'est, par exemple, utile pour montrer l'unicité d'une solution dans une équation…

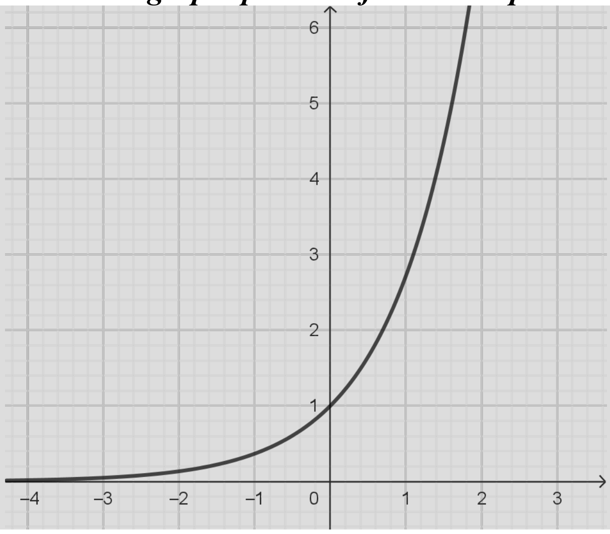
Propriété n°9. ***Corollaire de la propriété n°8***

Soit a et b deux nombres réels.

$$\boxed{\exp(a) = \exp(b) \Leftrightarrow a = b}$$

LA FONCTION EXPONENTIELLE

Connaissance n°1 ***La représentation graphique de la fonction exponentielle.***



IV Une nouvelle notation pour la fonction exponentielle

Remarque n°4.

Les propriétés n°4, n°5 et n°8 nous rappelle les propriétés sur les puissances.
Par exemple,

$7^{2+3} = 7^2 \times 7^3$ ressemble beaucoup à $\exp(2+3) = \exp(2) \times \exp(3)$

Comme $7^1 = 7$, on est tenté de regarder $\exp(1)$. Ce nombre n'est malheureusement pas entier, ce n'est même pas une fraction (vous le démontrerez un jour) mais il est aussi important que le nombre π. Pour cela, on va lui donner un nom.

Définition n°2.

- On note e le nombre $\exp(1)$
- On a : $\boxed{e \approx 2{,}71828}$
- Pour tout réel x, on pose $\boxed{e^x = \exp(x)}$

Remarque n°5. ***Résumé des propriétés avec la nouvelle notation***

Soit a et b des réels et n un entier naturel .

$\boxed{e^{a+b} = e^a \times e^b}$, $\boxed{e^{-a} = \dfrac{1}{e^a}}$, $\boxed{e^{a-b} = \dfrac{e^a}{e^b}}$ et $\boxed{e^{na} = \left(e^a\right)^n}$

$\boxed{a < b \Leftrightarrow \exp(a) < \exp(b)}$ et aussi avec $>$, $\leqslant$ ou $\geqslant$

$\boxed{\exp(a) = \exp(b) \Leftrightarrow a = b}$

V Le résumé du cours

La définition de exp

On appelle fonction Exponentielle et on note exp l'unique fonction définie sur $\mathbb{R}$, vérifiant :

$$\boxed{\begin{cases} \forall x \in \mathbb{R}, \exp'(x) = \exp(x) \\ \exp(0) = 1 \end{cases}}$$

exp ne s'annule pas

$$\boxed{\forall x \in \mathbb{R}, \exp(x) \neq 0}$$

Soit a et b deux nombres réels, alors :

$$\boxed{\exp(a+b) = \exp(a) \times \exp(b)}$$

$$\boxed{\forall x \in \mathbb{R}, \frac{1}{\exp(x)} = \exp(-x)}$$

exp est strictement positive

$$\boxed{\forall x \in \mathbb{R}, \exp(x) > 0}$$

Puissance n^ième^ d'une exponentielle

$\forall n \in \mathbb{N}, \forall a \in \mathbb{R},$

$$\boxed{(\exp(a))^n = \exp(na)}$$

exp est strictement croissante

La fonction exp est strictement croissante sur $\mathbb{R}$.

Équations et Inéquations

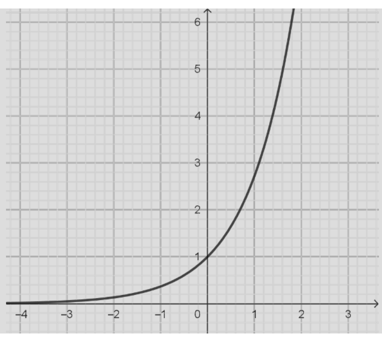
Pour tous nombres réels a et b :

$$\boxed{\exp(a) = \exp(b) \Leftrightarrow a = b}$$

$$\boxed{a < b \Leftrightarrow \exp(a) < \exp(b)}$$

et aussi avec $>$, $\leqslant$ ou $\geqslant$

Représentation graphique de exp



Nouvelle notation de exp

- On note e le nombre $\exp(1)$
- On a : $\boxed{e \approx 2{,}71828}$
- Pour tout réel x, on pose $\boxed{e^x = \exp(x)}$

Propriétés algébriques de exp

Soit a et b des réels et n un entier naturel.

$\boxed{e^{a+b} = e^a \times e^b}$, $\boxed{e^{-a} = \dfrac{1}{e^a}}$, $\boxed{e^{a-b} = \dfrac{e^a}{e^b}}$ et $\boxed{e^{na} = (e^a)^n}$

Équations et Inéquations

$\boxed{a < b \Leftrightarrow e^a < e^b}$ et aussi avec $>$, $\leqslant$ ou $\geqslant$

$\boxed{e^a = e^b \Leftrightarrow a = b}$

LA FONCTION EXPONENTIELLE E01

EXERCICE N°1 Savoir calculer

Simplifier les expressions suivantes.

1) $\left(e^3\right)^2 \times e^5$ **2)** $e^{-2} \times e^7 \times e$ **3)** $\dfrac{e^4}{e^7}$

4) $\dfrac{e^{-2}}{e}$ **5)** $\left(\dfrac{e^2}{e^{-3}}\right)^3$ **6)** $\left(e^2-1\right)\left(e^2+1\right)$

EXERCICE N°2 Savoir calculer avec une inconnue

Soit $x \in \mathbb{R}$. Simplifier les expressions suivantes.

1) $\left(e^{\frac{x}{2}}\right)^2$ **2)** $e^{2x} \times e$ **3)** $\dfrac{e^{4x}}{e^{-x}}$

4) $\left(\dfrac{1}{e^x}\right)^2$ **5)** $\dfrac{e^{3x} \times e^{-x}}{e^x}$ **6)** $e^x \times \left(e^{-2x}\right)^3$

EXERCICE N°3 Savoir développer

Développer les expressions suivantes.

1) $\left(e^2-e\right)^2$ **2)** $\left(e^3-e\right)\left(1-e^2\right)$

3) $e^2\left(e^{-2}+e\right)$ **4)** $e\left(e^{-1}+e^2\right)$

5) $\left(e^4-e^{-4}\right)^2$ **6)** $\left(1-e^3\right)\left(1+e^3\right)$

EXERCICE N°4 Savoir développer avec une inconnue

Soit $x \in \mathbb{R}$. Développer les expressions suivantes.

1) $e^2\left(e^{-x+3}+e^{-x-1}\right)$ **2)** $\left(e^x-e^{-x}\right)\left(1-e^x\right)$

3) $\left(e^x+1\right)^2$ **4)** $\left(e^{-x}+e^{4x}\right)e^x$

5) $\left(e^{-x}+e^x\right)^2$ **6)** $\left(e-e^x\right)\left(e+e^x\right)$

EXERCICE N°5 Savoir factoriser

Factoriser les expressions suivantes.

1) e^2-4e **2)** e^4-1 **3)** $e-e^3$

EXERCICE N°6 Savoir factoriser avec une inconnue

Soit $x \in \mathbb{R}$. Factoriser les expressions suivantes.

1) $e^{3x}-e^x$ **2)** $e^{2x}-e^{4x}$ **3)** $2e^{2x}-4e^x$

EXERCICE N°7 On mélange

Soit $x \in \mathbb{R}$. Simplifier les expressions suivantes.

1) $\left(e^x-1\right)\left(2e^{-x}+3\right)$ **2)** $\left(1-e^{-x}\right)^2$

3) $\left(x-e^x\right)\left(x+e^{-x}\right)$ **4)** $\left(3x+\dfrac{1}{e^x}\right)\left(4+e^x\right)$

5) $\left(e^{-2x}\right)^3 \times \left(1-e^{6x}\right)$ **6)** $\left(2e^x-e^{-1}\right)^2$

LA FONCTION EXPONENTIELLE E02

EXERCICE N°1 Résoudre une équation (niveau 0)

Résoudre dans $\mathbb{R}$ les équations suivantes.

1) $e^x = 1$ **2)** $e^x = e^{-1}$ **3)** $e^x - e = 0$

EXERCICE N°2 Résoudre une équation (niveau 1)

Résoudre dans $\mathbb{R}$ les équations suivantes.

1) $e^{2x+4} = 1$ **2)** $e^{-3x+7} = e^{-2}$ **3)** $e^{x^2} - e = 0$

EXERCICE N°3 Résoudre une inéquation (niveau 0)

Résoudre dans $\mathbb{R}$ les inéquations suivantes.

1) $e^x > e$ **2)** $e^x \leqslant 0$ **3)** $e^x < e^{-2}$

EXERCICE N°4 Résoudre une inéquation (niveau 1)

Résoudre dans $\mathbb{R}$ les inéquations suivantes.

1) $e^{3x+1} > 1$ **2)** $e^{-2x+1} \geqslant e^4$ **3)** $e^{2x+1} + e^{5x-7} < 0$

EXERCICE N°5 Résoudre une équation (niveau 2)

Résoudre dans $\mathbb{R}$ les équations suivantes.

1) $e^x \times e^{2x} = 1$ **2)** $\left(e^x\right)^3 = e$ **3)** $\dfrac{e^{3x}}{e^2} = e$

EXERCICE N°6 Résoudre une inéquation (niveau 2)

Résoudre dans $\mathbb{R}$ les inéquations suivantes.

1) $e^x\left(e - e^{-x}\right) > e^3 - 1$ **2)** $e^{2x-3} \leqslant e^x \times e^{-7x+2}$ **3)** $e^{x+2}\left(-e^{-2} + 1\right) \geqslant -e^x + e^5$

EXERCICE N°7 Résoudre une équation (niveau 3)

Résoudre dans $\mathbb{R}$ les équations suivantes.

1) $(x+2)\left(e^x - 1\right) = 0$ **2)** $\left(e^{-x} - e\right)^2 = 0$ **3)** $e^x(-2x+4) = 0$

EXERCICE N°8 Résoudre une inéquation (niveau 4)

Résoudre dans $\mathbb{R}$ les équations suivantes.

1) $e^x - 3xe^x = 0$ **2)** $xe^x - x = 0$

3) $-2e^{x+1} + 5xe^{x+1} = 0$ **4)** $2xe^{-x} - x^2e^{-x} = 0$

LA FONCTION EXPONENTIELLE E03

EXERCICE N°1 Étudier les variations d'une fonction (niveau 1)

Étudier les variations des fonctions suivantes, toutes définies sur $\mathbb{R}$.

1) $f : x \mapsto e^x - e\,x$ **2)** $g : x \mapsto e^{-5x} + 5x$ **3)** $h : x \mapsto e^{2x} - 2x + 1$

EXERCICE N°2 Étudier les variations d'une fonction (niveau 2)

Étudier les variations des fonctions suivantes sur leur ensemble de définition D .

1) $f : x \mapsto (x+1)e^x$ avec $D = \mathbb{R}$

2) $f : x \mapsto \dfrac{4x}{e^x}$ avec $D = \mathbb{R}$

3) $f : x \mapsto \dfrac{4e^x}{x}$ avec $D = \mathbb{R}^* =]-\infty \,;\, 0[\cup]0 \,;\, +\infty[$

EXERCICE N°3 Étudier les variations d'une fonction (niveau 3)

Étudier les variations des fonctions suivantes sur leur ensemble de définition D .

1) $f : x \mapsto \dfrac{e^x + 1}{e^x - 1}$ avec $D = \mathbb{R}^* =]-\infty \,;\, 0[\cup]0 \,;\, +\infty[$

2) $f : x \mapsto (-2x+3)e^{2x+4}$ avec $D = \mathbb{R}$

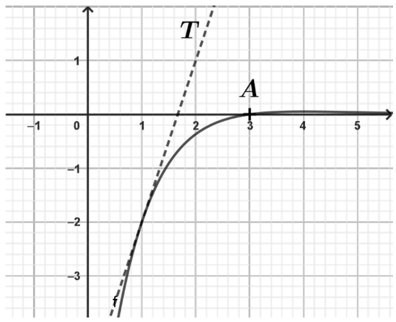
3) $f : x \mapsto \dfrac{6e^x}{x-5}$ avec $D = \mathbb{R}\setminus\{5\} =]-\infty \,;\, 5[\cup]5 \,;\, +\infty[$

Quiz

LA FONCTION EXPONENTIELLE E04

EXERCICE N°1 Avec un graphique

On considère une fonction f définie pour tout $x \in \mathbb{R}$ par $f(x) = \dfrac{ax+b}{e^x}$ où a et b sont deux réels.



Sa courbe représentative C_f a été tracée dans le repère ci-contre. C_f passe par le point $A(3\ ;\ 0)$ et la tangente T à C_f au point d'abscisse 1 a été tracée dans le repère.

1) Déterminer la valeur de a et de b.

2) Étudier les variations de la fonction f.

3) Déterminer une équation de la tangente à C_f au point d'abscisse 0.

EXERCICE N°2 Avec des suites

Donner la nature et la raison des suites ci-dessous.

1) (u_n) définie pour $n \in N$ par $u_n = e^n$

2) (v_n) définie pour $n \in N$ par $v_n = e^{-6n}$

3) (w_n) définie pour $n \in N$ par $w_n = 2e^{3n}$

4) (r_n) définie pour $n \in N$ par $r_n = e^2 n$

5) (t_n) définie pour $n \in \mathbb{N}$ par $t_n = 4+e^5 n$

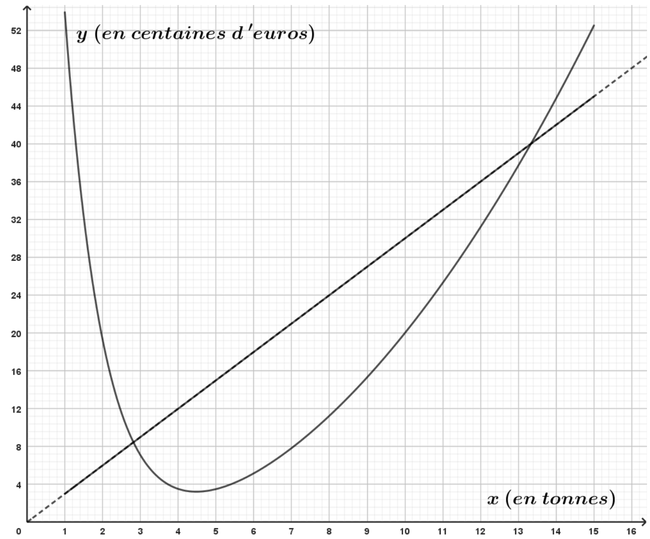
EXERCICE N°3 Du concret : Optimisation et lecture graphique

Extrait du sesamath 114 p 185

L'entreprise BBE (Bio Bois Énergie) fabrique et vend des granulés de bois pour alimenter des chaudières et des poêles chez des particuliers ou dans des collectivités. L'entreprise produit entre 1 et 15 tonnes de granulés par jour.

Les coûts de fabrications sont modélisés par une fonction C définie sur $[1\ ;\ 15]$ par $\boldsymbol{C(x)=0,3x^2-x+e^{-x+5}}$ où x désigne la quantité de granulés en tonnes et $C(x)$ le coût de fabrication quotidien correspondant en centaines d'euros.

Pour cette entreprise, le prix de vente d'une tonne de granulés de bois est de 300 euros.



1) Déterminer la recette $R(x)$ en centaines d'euros obtenues pour x tonnes de granulés vendus.

2) Calculer les coûts de production pour 5 tonnes de granulés produites.

3) On donne dans le graphique ci-après les représentations graphiques des fonctions C et R.

3.a) Associer chaque courbe à sa fonction.

3.b) Déterminer graphiquement pour quelle quantité de granulés le coût quotidien est minimal.

3.c) Déterminer le bénéfice réalisé pour 6 tonnes fabriquées et vendues.

3.d) Déterminer pour quelle quantités produite et vendues l'entreprise réalise un bénéfice.

Aide au calcul
$13{,}2-e^{-1} \approx 12{,}83$

EXERCICE N°4 Changement de variable

1) Résoudre dans $\mathbb{R}$ l'équation $x^3+2x^2-3x = 0$.

2) En déduire les solutions dans $\mathbb{R}$ des équations suivantes.

2.a) $x^6+2x^4-3x^2 = 0$

2.b) $e^{3x}+2e^{2x}-3e^x = 0$