
Calculus

Propriétés générales des fonctions réelles

Autocorrection A. ✓

Peut-on déterminer, en général, la parité de

- (i) la somme de deux fonctions, si on connaît leur parité ?
- (ii) le produit de deux fonctions, si on connaît leur parité ?
- (iii) la composée de deux fonctions, si on connaît leur parité ?
- (iv) la composée $h \circ f$, si f est paire (resp. impaire) et h est quelconque ?
- (v) la composée $f \circ h$, dans les mêmes conditions ?

Exercice 1⁺. 💡 ✓

Soit $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction telle que $f \circ f$ soit croissante et $f \circ f \circ f$ strictement décroissante. Montrer que f est strictement décroissante.

Exercice 2. _____

Soit $A \subseteq \mathbb{R}$. Montrer que $\cos^{-1}[A]$ est un domaine 2π -périodique.

Exercice 3⁺⁺. 💡

Soit $\alpha \in \mathbb{R}$.

1. Montrer que $x \mapsto \cos(x) + \cos(\alpha x)$ est périodique si et seulement si $\alpha \in \mathbb{Q}$.
2. Même question pour la fonction $x \mapsto \sin(x) + \sin(\alpha x)$.

Exercice 4. _____

Soit $D \subseteq \mathbb{R}$ et $T \in \mathbb{R}_+^*$.

1. Montrer que D est un domaine T -périodique si et seulement si $\mathbb{1}_D$ est une fonction T -périodique.
2. À quelle condition portant sur D la fonction $\mathbb{1}_D$ est-elle paire ?
3. À quelle condition portant sur D la fonction $\mathbb{1}_D$ est-elle impaire ?
4. À quelle condition portant sur D la fonction $\mathbb{1}_D$ est-elle croissante ?

Exercice 5⁺. _____

Soit $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction telle que le graphe de f admette deux centres de symétrie.

Montrer que f est la somme d'une fonction affine et d'une fonction périodique.

Fonctions usuelles

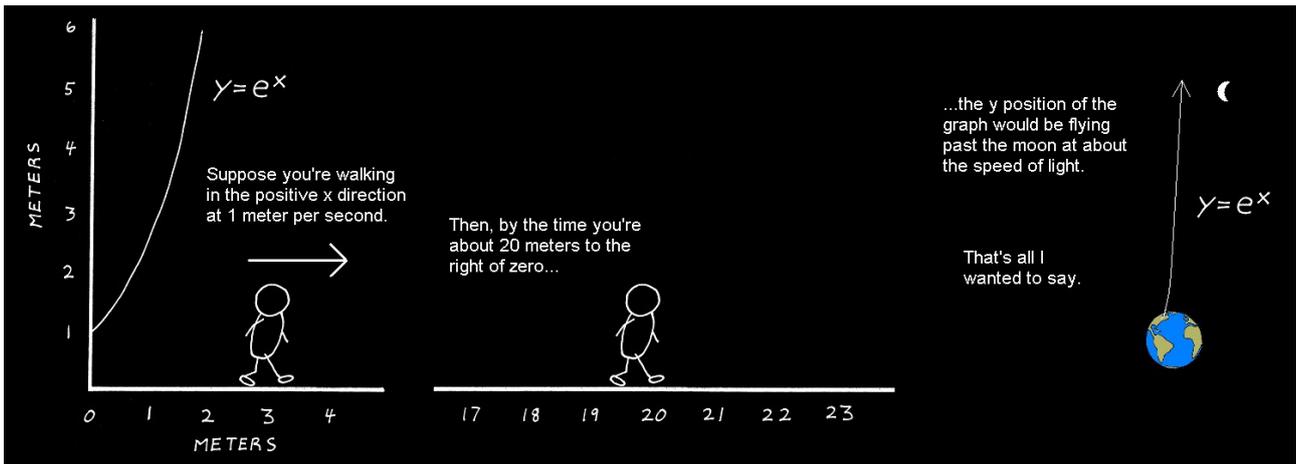
Exponentielle et logarithme

Autocorrection B. ✓

Déterminer pour quels valeurs de x l'expression $x^{\frac{\ln(\ln x)}{\ln x}}$ a un sens, et simplifier l'expression.

Exercice 6.

Justifier ce strip du webcomic *Abstruse Goose* (<http://abstrusegoose.com/218>).



Exercice 7.

Trouver tous les $a \in \mathbb{R}_+^*$ tels que $\forall x \in \mathbb{R}, a^x \geq x + 1$.

Exercice 8.

Le plus grand nombre premier connu à ce jour est $2^{82589933} - 1$ (il a été découvert le 7 décembre 2018 par le projet *Great Internet Mersenne Prime Search*). Combien y a-t-il de chiffres dans son écriture décimale ?

Exercice 9.

Existe-t-il un entier n tel que $30^{4^{1777}}$ et 2^n aient le même nombre de chiffres ?

Exercice 10⁺⁺.

Montrer que l'exponentielle n'est pas la somme d'un nombre fini de fonctions périodiques. (Notons que l'on ne met aucune hypothèse de régularité sur ces fonctions périodiques).

Exercice 11.

Résoudre l'équation $2^{x+4} + 3^x = 2^{x+2} + 3^{x+2}$.

Exercice 12⁺.

Résoudre les deux systèmes suivants (a désigne un paramètre réel).

$$(i) \begin{cases} 8^x = 10y \\ 2^x = 5y \end{cases}$$

$$(ii) \begin{cases} e^x e^{2y} = a \\ 2xy = 1 \end{cases}$$

Exercice 13⁺.

Déterminer les couples $(x, y) \in (\mathbb{R}_+^*)^2$ tels que $\begin{cases} 2 \ln x - 3 \ln y = \ln 2 \\ x - y = 2. \end{cases}$

Exercice 14.

Déterminer les $x \in]1, +\infty[$ tels que $\ln(x-1) + \ln(x+1) < 2 \ln x - 1$.

Fonctions hyperboliques

Exercice 15.

1. Soit x et $y \in \mathbb{R}$. Montrer

$$\operatorname{ch}(x+y) = \operatorname{ch} x \operatorname{ch} y + \operatorname{sh} x \operatorname{sh} y \quad \text{et} \quad \operatorname{sh}(x+y) = \operatorname{ch} x \operatorname{sh} y + \operatorname{sh} x \operatorname{ch} y.$$

2. (a) Donner une formule pour $\operatorname{th}(x+y)$.

(b) Montrer $\forall a, b \in]-1, 1[, \frac{a+b}{1+ab} \in]-1, 1[$.

Exercice 16.

Montrer $\forall p \in \mathbb{N}, \forall x \in \mathbb{R}, (\operatorname{ch} x + \operatorname{sh} x)^p = \operatorname{ch}(px) + \operatorname{sh}(px)$.

Exercice 17.

Soit $n \in \mathbb{N}^*$ et $x \in \mathbb{R}$. Simplifier $2^n \prod_{k=1}^n \operatorname{ch} \frac{x}{2^k}$.

Exercice 18.

Soit $a, b \in \mathbb{R}$. Résoudre l'équation $a \operatorname{ch} x + b \operatorname{sh} x = 0$. 

Exercice 19.

Soit $n \in \mathbb{N}^*$ et $x, y \in \mathbb{R}$. Calculer $\sum_{k=0}^n \operatorname{ch}(x+ky)$ et $\sum_{k=0}^n \operatorname{sh}(x+ky)$. 

Fonctions trigonométriques

Exercice 20.

Soit p et q deux réels.

1. À quelle condition a-t-on $\sin p + \sin q \neq 0$?

2. Si la condition de la question précédente est remplie, simplifier $\frac{\cos p - \cos q}{\sin p + \sin q}$.

3. En déduire $\tan \frac{\pi}{24}$.

Exercice 21.

Montrer que le graphe de \arccos possède un centre de symétrie. 

Exercice 22.

Montrer les formules suivantes :

▶ $\frac{\pi}{2} = 2 \arctan \frac{1}{2} + \arctan \frac{4}{7} + \arctan \frac{1}{8}$ (Newton, 1676) ;

▶ $\frac{\pi}{4} = \arctan \frac{1}{2} + \arctan \frac{1}{3}$ (Machin, 1706) ;

▶ $\frac{\pi}{4} = \arctan \frac{1}{2} + \arctan \frac{1}{5} + \arctan \frac{1}{8}$ (Schulz von Strassnitzky, 1844).

Exercice 23.

1. Montrer que $\arctan(2\sqrt{2}) + 2 \arctan(\sqrt{2}) = \pi$.

2. En déduire la valeur de $\arctan\left(\frac{1}{2\sqrt{2}}\right) + 2 \arctan\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)$.

Études de fonctions

Autocorrection C. ✓

Pour chacune des expressions suivantes, dire pour quelles valeurs de x elle a un sens. On obtient ainsi une fonction $f : D \rightarrow \mathbb{R}$, pour une certaine partie $D \subseteq \mathbb{R}$. Préciser un ensemble D' de points où f est dérivable, et la dériver. (On désigne par a, b , des nombres réels > 0 fixés une fois pour toutes).

- | | | |
|--|--|---|
| (a) $\exp(-a/x^2)$; | (q) $\arcsin(\tan x)$; | (ι) $\frac{\cos(2x)}{x^2 - 2}$; |
| (b) $\frac{\cos(ax^2 + bx + 1)}{\sin x}$; | (r) $\operatorname{sh} x \sin x$; | (κ) $\ln(\cos(2x))$; |
| (c) $\left(1 + \frac{a}{x}\right)^x$; | (s) $\sqrt{x + \sqrt{x}}$; | (λ) $\frac{ x \sqrt{x^2 - 2x + 1}}{x - 1}$; |
| (d) $\sqrt{1 + \cos^2 x}$; | (t) $\ln(1 + \operatorname{ch} x)$; | (μ) $\ln(x - \sqrt{x^2 - 1})$; |
| (e) $(ax + b)^x$; | (u) x^x ; | (ν) $\ln \sqrt{\frac{x+1}{x-1}}$; |
| (f) $x - a\sqrt{x}$; | (v) $\cos(x) \ln(1 + x)$; | (ξ) $\ln(\ln x)$; |
| (g) $\arctan(e^x)$; | (w) $\ln\left(\tan\left(\frac{x}{2}\right)\right)$; | (ο) $\ln(\ln(\ln x))$; |
| (h) $\arcsin(x^2 - 1)$; | (x) $\arctan(\operatorname{ch}(x))$; | (π) $\sin x \sin \frac{1}{x}$; |
| (i) $\arccos\left(\frac{1}{1+x}\right)$; | (y) $\frac{1}{\operatorname{sh}(\arcsin(x))}$; | (ρ) $\sqrt{1 + x^2 \sin^2 x}$; |
| (j) $\arctan \sqrt{\frac{1 - \sin x}{1 + \sin x}}$; | (z) $\frac{\sin x}{(\cos x + 2)^4}$. | (σ) $\ln\left(\frac{1 + \sin x}{1 - \sin x}\right)$; |
| (k) $\frac{\cos^3 x}{(1 - \cos x)^2}$; | (α) $\ln(\arctan x)$; | (τ) $e^{\cos x}$; |
| (l) $\sin\left(\ln x + \frac{1}{x}\right)$; | (β) $(\operatorname{ch} x)^x$; | (υ) $\frac{x}{x^2 + 1}$; |
| (m) $\frac{x+1}{\sin(2x)}$; | (γ) $x^3 \cos(5x + 1)$; | (φ) $\arcsin\left(\frac{1}{\operatorname{ch} x}\right)$; |
| (n) $\sin((2x + 5)^2)$; | (δ) $\frac{1}{\sin(x^2)}$; | (χ) $\frac{x}{\sin x}$; |
| (o) $\arccos\left(\frac{1+x}{1-x}\right)$; | (ε) $\ln(e^x + 1)$; | (ψ) $\ln(\arcsin(x^2))$; |
| (p) $\sqrt{\arcsin x - \frac{\pi}{6}}$; | (ζ) $e^{x^3 + 2x^2 + 3x + 4}$; | (ω) $\ln(e^x + \sin x)$. |
| | (η) $\exp(\sqrt{x^2 + x + 1})$; | |
| | (θ) $\frac{\exp(1/x) + 1}{\exp(1/x) - 1}$; | |

Exercice 24. ✓

Décrire pour quels $x \in \mathbb{R}$ les expressions suivantes ont un sens, puis tracer rapidement le graphe des fonctions qu'elles définissent.

- | | | |
|-----------------------------|--------------------------|------------------------------|
| (i) $2 \ln \frac{1}{2-x}$; | (ii) $\sqrt{3x-2} - 1$; | (iii) $\frac{4}{2x+1} + 3$. |
|-----------------------------|--------------------------|------------------------------|

Exercice 25. ✓

Étudier, selon le plan vu en cours, les fonctions définies par les expressions suivantes.

- | | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| (i) $\frac{x^3}{x^2 - 3}$; | (iii) $\sqrt{\frac{\ln x }{x}}$; | (v) $x \arctan \frac{1}{x}$; |
| (ii) $\ln(x^2 - 1)$; | (iv) $\frac{\tan 2x}{\tan x}$; | (vi) $\sin(3x) + 3 \sin x$. |

Exercice 26⁺. _____ 

Soit $W : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+$ une fonction, que l'on ne suppose pas dérivable *a priori*. On suppose que

$$\forall x \in \mathbb{R}_+, W(x) e^{W(x)} = x.$$

Déterminer les variations de W .

Identités

Exercice 27⁺. _____  

1. Trouver tous les triplets de réels (a, b, c) tels que $\forall x \in \mathbb{R}, a e^{2x} + b e^x + c = e^{2x} + 2e^x - 1$.
2. Même question avec l'égalité $\forall x \in [-1, 1], a \arccos x + b \arcsin x + c = \arccos x + 2 \arcsin x - 1$.

Exercice 28. _____  

1. Pour $x \in \mathbb{R}$, simplifier $\arctan(\operatorname{sh} x) + \arccos(\operatorname{th} x)$.
2. Résoudre l'équation $\operatorname{th} x = \frac{5}{13}$ d'inconnue $x \in \mathbb{R}$.
3. En déduire l'égalité $\arctan \frac{5}{12} + \arccos \frac{5}{13} = \frac{\pi}{2}$.

Exercice 29. _____

1. Soit a et b deux réels tels que $ab \neq 1$. Simplifier $\arctan a + \arctan b - \arctan \frac{a+b}{1-ab}$.
2. Soit $x \in \mathbb{R}$. Simplifier $\arctan \frac{1+x}{1-x}$.

Exercice 30. _____

1. Montrer, à l'aide d'une étude de fonctions, que $\forall n \in \mathbb{N}^*, \arctan \frac{1}{\sqrt{n}} = \arcsin \frac{1}{\sqrt{n+1}}$.
2. Démontrer le même résultat à l'aide de trigonométrie élémentaire.

Exercice 31. _____ 

1. Soit $x \in \mathbb{R}$. Simplifier $\arctan(x+1) - \arctan x$.
2. Soit $n \geq 1$. Déduire de ce qui précède une expression de $S_n = \sum_{k=0}^n \arctan \frac{1}{k^2 + k + 1}$.
3. Que dire de S_n quand $n \rightarrow +\infty$?

Exercice 32.

Dire pour quels $x \in \mathbb{R}$ les expressions suivantes ont un sens, puis simplifier.

- | | |
|--|------------------------------|
| (i) $\frac{1 + \sin x}{\cos x} - \frac{\cos x}{1 - \sin x}$; | (vi) $\cos(\arctan x)$; |
| (ii) $\frac{1 - \tan^2 x}{1 + \tan^2 x}$; | (vii) $\cos(2 \arccos x)$; |
| (iii) $\frac{1 - 2 \cos x - 3 \cos^2 x}{\sin^2 x} - \frac{1 - 3 \cos x}{1 - \cos x}$; | (viii) $\cos(2 \arcsin x)$; |
| (iv) $\tan(\arcsin x)$; | (ix) $\sin(2 \arccos x)$; |
| (v) $\sin(\arccos x)$; | (x) $\cos(2 \arctan x)$; |
| | (xi) $\sin(2 \arctan x)$; |
| | (xii) $\tan(2 \arcsin x)$. |

Inégalités**Exercice 33.**

Montrer les inégalités suivantes. ✓

- | | |
|--|---|
| (i) $\forall x > 0, x + \frac{1}{x} \geq 2$; | (iii) $\forall x \in [0, 2], \frac{1}{3} \leq \frac{x+1}{x^2+3} \leq \frac{1}{2}$; |
| (ii) $\forall x \in]0, 4[\setminus \{1\}, \left \frac{x+2}{1-x} \right \geq 2$; | (iv) $\forall x \in \mathbb{R}, -\frac{1}{6} \leq \frac{x+1}{x^2+3} \leq \frac{1}{2}$. |

Exercice 34.

Montrer les inégalités suivantes. ✓

- | | |
|---|--|
| (i) $\forall x \in \mathbb{R}_+, e^x \geq 1 + x$; | (iv) $\forall x \geq 0, (x-2)e^x + (x+2) \geq 0$; |
| (ii) $\forall x \in \mathbb{R}_+^* \setminus \{1\}, \frac{x+1}{x-1} \ln x \geq 2$; | (v) $\forall n \geq 2, \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \leq e \leq \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{-n}$. |
| (iii) $\forall x > 0, x \ln x - (x-1) \leq (x-1)^2$; | |

Exercice 35.

Montrer les inégalités suivantes.

- | | |
|--|--|
| (i) $\forall x \in \mathbb{R}, \sin x \leq x $; | (iii) $\forall x \in \mathbb{R}, 0 \leq 1 - \cos x \leq \frac{x^2}{2}$; |
| (ii) $\forall x \in [-1, 1], \arcsin x \geq x $; | (iv) $\forall x \in \left]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right[, \tan x \geq x $. |

Exercice 36 (Inégalité de Huygens).

Montrer $\forall x \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right], x \leq \frac{2}{3} \sin(x) + \frac{1}{3} \tan(x)$.

Exercice 37⁺ (Inégalité de Mitrinović-Adamović).

Montrer $\forall x \in \left]0, \frac{\pi}{2}\right[, \cos(x) < \left(\frac{\sin x}{x}\right)^3$. 💡

Exercice 38.

Montrer

$$\forall p \in \mathbb{N}, \forall x \in]-1, +\infty[, \ln(1+x) \leq \sum_{k=1}^{2p+1} (-1)^{k+1} \frac{x^k}{k}.$$

Exercice 39⁺⁺.Soit $A \subseteq \mathbb{R}$ de cardinal 13. Montrer qu'il existe $a, b \in A$ tels que

$$0 < \frac{a-b}{1+ab} \leq 2 - \sqrt{3}.$$

Équations**Exercice 40.**

1. Montrer que l'équation $x \ln x = 1$ possède une unique solution dans \mathbb{R}_+^* .
2. Montrer que la fonction $\begin{cases} \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \\ x \mapsto \frac{1}{\operatorname{ch} x} \end{cases}$ possède un unique point fixe.
3. Montrer que l'équation $e^{-x^2} = e^x - 1$ possède une unique solution dans \mathbb{R} .

Exercice 41.Résoudre l'équation $\cos^3 x + \sin^3 x = 1$.**Exercice 42.**

Résoudre les équations suivantes.

- | | |
|---|---|
| (i) $\cos(2x - \pi/3) = \sin(x + 3\pi/4)$; | (iv) $\sin x + \sin 2x + \sin 3x = 0$; |
| (ii) $\cos 4x + \sin 4x = 1$; | (v) $3 \cos x - 3 \sin x = 6$; |
| (iii) $\sin x + \sin 3x = 0$; | (vi) $2 \sin x \cos x + \sqrt{3} \cos 2x = 0$. |

Exercice 43.Résoudre l'équation $\tan x \tan 2x = 1$.**Exercice 44.**

Résoudre les équations suivantes.

- | | |
|---|--|
| (i) $\arcsin 2x = \arccos x$; | (iv) $\arcsin x = \arccos \frac{1}{3} - \arccos \frac{1}{4}$; |
| (ii) $\arcsin(x+1) - \arcsin x = \frac{\pi}{6}$; | (v) $\arcsin \frac{2x}{1+x^2} = \frac{\pi}{3}$; |
| (iii) $\arctan x + \arctan(2x) = \frac{\pi}{4}$; | (vi) $\arcsin x = \arctan 2 + \arctan 3$. |

Dérivées supérieures

Exercice 45. ☑

Soit $n \in \mathbb{N}$ et $\alpha \in \mathbb{R}$. Déterminer la dérivée n -ième des applications suivantes.

- | | | |
|--------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| (i) $x \mapsto \cos(3x)$; | (iv) $x \mapsto x^\alpha$; | (vii) $x \mapsto \frac{1}{x^2 - 1}$; |
| (ii) $x \mapsto x^5 e^{3x}$; | (v) $x \mapsto x^2 \sin x$; | (viii) $x \mapsto x^{n-1} \ln(1+x)$. |
| (iii) $x \mapsto e^x \cos x$; | (vi) $x \mapsto \cos^3 x$; | |

Exercice 46. 💡

Soit $n \in \mathbb{N}^*$. Calculer la dérivée n -ième de la fonction $f_n : x \mapsto x^{n-1} e^{1/x}$.

Exercice 47⁺. 💡

On note $f = \arctan$ pour simplifier.

1. Montrer que f est lisse et que

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, \forall x \in \mathbb{R}, f^{(n)}(x) = (n-1)! \cos^n(f(x)) \sin\left(n\left(\frac{\pi}{2} + f(x)\right)\right).$$

2. En déduire, pour tout $n \in \mathbb{N}$, l'ensemble des points d'annulation de $f^{(n)}$.

Exercice 48⁺. ☑

Montrer que la fonction \tan est lisse et *absolument monotone* sur $\left[0, \frac{\pi}{2}\right[$, c'est-à-dire que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \forall x \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right[, \tan^{(n)}(x) \geq 0.$$

Exercice 49⁺. ☑

1. Montrer que la fonction \arcsin est trois fois dérivable sur $] -1, 1[$ et calculer $f = \left(\frac{\arcsin''}{\arcsin'}\right)'$.

On exprimera le résultat sous la forme d'une fonction $x \mapsto \frac{\alpha}{x + \beta} + \frac{\gamma}{x + \delta}$.

On dit qu'une fonction est *absolument monotone* sur un intervalle si elle y est lisse, et que toutes ses dérivées y sont ≥ 0 .

2. Montrer que f est absolument monotone.
3. En déduire que \arcsin est absolument monotone.

Exercice 50. ☑

En calculant de deux façons la dérivée n -ième de $x \mapsto x^{2n}$, retrouver l'expression de $\sum_{k=0}^n \binom{n}{k}^2$.

Exercice 51⁺. ☑

Soit $n \in \mathbb{N}^*$. En calculant de deux façons différentes la dérivée n -ième de $x \mapsto x^n \ln(x)$, montrer

$$\sum_{k=1}^n \frac{(-1)^{k-1}}{k} \binom{n}{k} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}.$$