Devoir maison n°3 :
Théorème de la corde universelle

Jules Charlier, Thomas Diot, Pierre Gallois, Jim Garnier
TE1

Partie A - Exemples.

Dans les parties A et B, n désigne un entier supérieur ou égal à 2.

1) Soient $f : x \mapsto 1 - |2x - 1|$ définie sur $[0, 1]$, et $n \in \mathbb{N} \setminus \{0, 1\}$.

On a $f\left(x + \frac{1}{n}\right) = 1 - \left|2x + \frac{2}{n} - 1\right|$.

De plus, $n \geqslant 2 \Longrightarrow 1 \geqslant \frac{2}{n} \Longrightarrow \frac{1}{2} \geqslant \frac{1}{n} \Longrightarrow \frac{1}{2} > \frac{1}{2} - \frac{1}{n} \geqslant 0$.

x	$\frac{0}{2}$		$\frac{1}{2} - \frac{1}{n}$		$\frac{1}{2}$		1
$\lvert 2x - 1\rvert$		$-2x + 1$		$-2x + 1$	0	$2x - 1$	
$f(x)$		$2x$		$2x$		$-2x + 2$	
$\left\lvert 2x - 1 + \frac{2}{n}\right\rvert$		$-2x + 1 - \frac{2}{n}$	0	$2x - 1 + \frac{2}{n}$		$2x - 1 + \frac{2}{n}$	
$f\left(x + \frac{1}{n}\right)$		$2x + \frac{2}{n}$		$-2x + 2 - \frac{2}{n}$		$-2x + 2 - \frac{2}{n}$	
$f(x) - f\left(x + \frac{1}{n}\right)$		$-\frac{2}{n}$		$4x - 2 + \frac{2}{n}$		$\frac{2}{n}$	

L'équation $f(x) = f\left(x + \frac{1}{n}\right)$ équivaut à $f(x) - f\left(x + \frac{1}{n}\right) = 0$ qui n'a pas de solutions sur $\left[0, \frac{1}{2} - \frac{1}{n}\right[\cup \left]\frac{1}{2}, 1\right]$ d'après les tableau d'expressions.

Pour tout $x \in \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{n}, \frac{1}{2}\right]$,

$$\begin{aligned} f(x) - f\left(x + \frac{1}{n}\right) = 0 &\Longleftrightarrow 4x - 2 + \frac{2}{n} = 0 \\ &\Longleftrightarrow x = \frac{1}{2} - \frac{1}{2n} \end{aligned}$$

Et :

$$n \geqslant 2 \Longrightarrow n > 0 \Longrightarrow \begin{cases} 2n > n \\ \frac{1}{2n} > 0 \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} \frac{1}{2n} < \frac{1}{n} \\ -\frac{1}{2n} < 0 \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{1}{2n} > \frac{1}{2} - \frac{1}{n} \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2n} < \frac{1}{2} \end{cases}$$

Notre solution est donc acceptable.

$$S = \left\{\frac{1}{2} - \frac{1}{2n}\right\}.$$

---

2) Soit $f : x \mapsto 16x^2(1 - x)^2$ définie sur $[0, 1]$. Pour tout $x \in \left[0, \frac{1}{n}\right]$,

$$\begin{aligned}
f\left(x+\frac{1}{n}\right)=f(x) &\iff f\left(x+\frac{1}{n}\right)-f(x)=0\\
&\iff 16\left(x+\frac{1}{n}\right)^2\left(1-x-\frac{1}{n}\right)^2-16x^2(1-x)^2=0\\
&\iff \left(\left(x+\frac{1}{n}\right)\left(1-x-\frac{1}{n}\right)\right)^2-(x(1-x))^2=0\\
&\iff \left(x-x^2-\frac{x}{n}+\frac{1}{n}-\frac{x}{n}-\frac{1}{n^2}\right)^2-\left(x-x^2\right)^2=0\\
&\iff \left(-x^2+\left(1-\frac{2}{n}\right)x+\frac{n-1}{n^2}\right)^2-\left(x-x^2\right)^2=0\\
&\iff \left(-x^2+\left(1-\frac{2}{n}\right)x+\frac{n-1}{n^2}+x-x^2\right)\left(-x^2+\left(1-\frac{2}{n}\right)x+\frac{n-1}{n^2}-x+x^2\right)=0\\
&\iff \left(-2x^2+\left(2-\frac{2}{n}\right)x+\frac{n-1}{n^2}\right)\left(-\frac{2}{n}x+\frac{n-1}{n^2}\right)=0\\
&\iff -2x^2+\left(2-\frac{2}{n}\right)x+\frac{n-1}{n^2}=0 \lor -\frac{2}{n}x+\frac{n-1}{n^2}=0\\
&\iff -2x^2+\frac{2n-2}{n}x+\frac{n-1}{n^2}=0 \lor x=\frac{n-1}{2n}
\end{aligned}$$

Et :

$$\begin{aligned}
0\leqslant \frac{n-1}{2n}\leqslant 1-\frac{1}{n} &\iff \begin{cases}0\leqslant n-1\\ n-1\leqslant 2n-2\end{cases}\\
&\iff \begin{cases}1\leqslant n\\ 0\leqslant n-1\end{cases}\\
&\iff n\geqslant 1
\end{aligned}$$

Vrai car $n\geqslant 2$, donc par équivalence, $\frac{n-1}{2n}\in\left[0,1-\frac{1}{n}\right]$.

Cette solution est donc acceptable, et ainsi l'équation $f\left(x+\frac{1}{n}\right)=f(x)$ admet au moins cette solution sur $\left[0,1-\frac{1}{n}\right]$.

---

3) Soit $f : x\mapsto x(e-e^x)$ définie et dérivable 2 fois sur $[0,1]$.

a)

$$\begin{aligned}
\forall x\in[0,1], f'(x)&=e-e^x+x(-e^x)=e-e^x-xe^x\\
f''(x)&=-e^x-e^x-xe^x=-e^x(2+x)
\end{aligned}$$

Or d'une part, $e^x>0$, et d'autre part, $x\geqslant 0$ donc $x+2>0$. Ainsi $f''(x)<0$ pour tout $x\in[0,1]$, et f' est donc strictement décroissante sur ce même intervalle.

$f'(0)=e-1>0$ et $f'(1)=e-e-e=-e<0$ donc d'après le théorème de la bijection, il existe un unique $\alpha\in[0,1]$ tel que $f'(\alpha)=0$.

x	0		α		1
$f''(x)$			$-$		
f'	$e-1$	$\searrow$	0	$\searrow$	$-e$
$f'(x)$		$+$	0	$-$	
f	0	$\nearrow$	$f(\alpha)$	$\searrow$	0

Partie B - Généralisation.

Soit f une fonction continue sur $[0,1]$ telle que $f(0)=f(1)$. Pour tout $x \in \left[0, 1-\frac{1}{n}\right]$, on pose $g(x)=f(x)-f\left(x+\frac{1}{n}\right)$.

1) La fonction continue $x \mapsto x+\frac{1}{n}$ a son ensemble image inclus dans $[0,1]$ d'après le théorème des valeurs intermédiaires. Or f est continue sur $[0,1]$ donc g est continue sur $[0,1]$ par opérations et composition de fonctions continues sur $[0,1]$.

---

2)

$$\begin{aligned}\sum_{k=0}^{n-1} g\left(\frac{k}{n}\right) &= \sum_{k=0}^{n-1} f\left(\frac{k}{n}\right) - f\left(\frac{k+1}{n}\right) \\ &= f(0)-f(1) \quad \text{par télescopage} \\ &= 0 \text{ car } f(0)=f(1)\end{aligned}$$

---

3) On recherche s'il existe $\alpha \in \left[0, 1-\frac{1}{n}\right]$ tel que $g(\alpha)=0$. Comme $\sum_{k=0}^{n-1} g\left(\frac{k}{n}\right)=0$,

- soit $g\left(\frac{k}{n}\right)$ est égal à 0 pour tous $k \in [0, n-1]$ et l'on peut prendre n'importe quel k pour avoir $\alpha=\frac{k}{n}$ puisque $k \in [\![0, n-1]\!]$ donc $\frac{k}{n} \in \left[0, 1-\frac{1}{n}\right]$.

- soit il existe k' tel que $g\left(\frac{k'}{n}\right) \neq 0$. Dans ce cas puisque la somme vaut 0, il existe nécessairement au moins un k'' tel que $g\left(\frac{k''}{n}\right)$ soit de signe opposé à $g\left(\frac{k'}{n}\right)$. Comme g est continue sur $[0,1]$, il existe d'après le théorème des valeurs intermédiaires[1] $\alpha \in \left[\frac{k'}{n} \leftrightarrow \frac{k''}{n}\right]$ tel que $g(\alpha) = 0$. Comme $\left[\frac{k'}{n} \leftrightarrow \frac{k''}{n}\right] \subseteq \left[0, 1 - \frac{1}{n}\right]$, on a bien $\alpha \in \left[0, 1 - \frac{1}{n}\right]$.

Partie C - Généraliser encore ?

Soit $T \in]0,1[$ tel que $\frac{1}{T} \notin \mathbb{Z}$, et f une fonction continue sur $[0,1]$ telle que $f(0) = f(1)$. On considére $f : x \mapsto \sin^2\left(\frac{\pi x}{T}\right) - x\sin^2\left(\frac{\pi}{T}\right)$ d'inconnue $x \in [0, 1-T]$.

1) Comme la fonction sinus est continue sur $\mathbb{R}$ et que $T \neq 0$, f est continue sur $[0,1]$ par opérations et composition de fonctions continues.

$$f(0) = \sin^2(0) - 0 = 0$$
$$f(1) = \sin^2\left(\frac{\pi}{T}\right) - \sin^2\left(\frac{\pi}{T}\right) = 0$$

Donc on a bien $f(0) = f(1)$.

---

2)

$$\begin{aligned}
f(x) - f(x+T) &= \sin^2\left(\frac{\pi x}{T}\right) \underline{- x\sin^2\left(\frac{\pi}{x}\right)} - \sin^2\left(\frac{\pi(x+T)}{T}\right) + (\underline{x} + T)\sin^2\left(\frac{\pi}{T}\right) \\
&= \sin^2\left(\frac{\pi x}{T}\right) - \sin^2\left(\frac{\pi x}{T} + \pi\right) + T\sin^2\left(\frac{\pi}{T}\right) \\
&= \sin^2\left(\frac{\pi x}{T}\right) - \left(\sin\left(\frac{\pi x}{T}\right)\underbrace{\cos(\pi)}_{=-1} + \cos\left(\frac{\pi x}{T}\right)\underbrace{\sin(\pi)}_{=0}\right)^2 + T\sin^2\left(\frac{\pi}{T}\right) \\
&= T\sin^2\left(\frac{\pi}{T}\right)
\end{aligned}$$

Or $T \neq 0$ et comme $\sin^2\left(\frac{\pi}{T}\right) = 0 \Leftrightarrow \sin\left(\frac{\pi}{T}\right) = 0 \Leftrightarrow \frac{\pi}{T} = 0$ ou $\frac{\pi}{T} = \pi$ et $T \neq 1$, on a que pour tout x dans $[0, 1-T]$, $f(x) - f(x+T) > 0$

---

3) On a que $f(x) - f(x+T) > 0$ ie $f(x) > f(x+T)$ donc $f(x) \neq f(x+T)$ pour tout x dans $[0, 1-T]$.

$f(x+T) = f(x)$ est impossible pour tout x dans $[0, 1-T]$.

[1]Soit $a, b \in \mathbb{R}$, $[a \leftrightarrow b] = \begin{cases} [a,b] \text{ si } a \leq b \\ [b,a] \text{ si } b < a \end{cases}$