

Mathématiques – Maths expertes

Corrigés des exercices

Table des matières

1 [Divisibilité, nombres premiers](#)

2

1 Divisibilité, nombres premiers

Exercice 1 1. • On écrit tous les produits d'entiers positifs qui donnent 20 :

$$20 = 1 \times 20 = 2 \times 10 = 4 \times 5,$$

donc les diviseurs de 20 sont

$$1, 2, 4, 5, 10 \text{ et } 20.$$

• On écrit tous les produits d'entiers positifs qui donnent 36 :

$$36 = 1 \times 36 = 2 \times 18 = 3 \times 12 = 4 \times 9 = 6 \times 6,$$

donc les diviseurs de 36 sont

$$1, 2, 3, 4, 6, 9, 12, 18 \text{ et } 36.$$

2. Le nombre 1452 est :

- divisible par 2, car il est pair ;
- divisible par 3, car la somme de ses chiffres, $1 + 4 + 5 + 2 = 12$, est divisible par 3 ;
- non divisible par 5, car il ne se termine ni par 0, ni par 5 ;
- non divisible par 9, car la somme de ses chiffres, 12, n'est pas divisible par 9.

Exercice 2 On factorise : l'égalité $x^2 - 2xy = 14$ se réécrit

$$x(x - 2y) = 14.$$

x et y sont des entiers naturels, donc $x - 2y$ est un entier. C'est même un entier naturel, car x et 14 sont positifs, donc par la règle des signes, $x - 2y$ est positif.

Or les différentes manières d'écrire 14 comme un produit d'entiers naturels sont :

$$14 = 1 \times 14 = 2 \times 7 = 7 \times 2 = 14 \times 1.$$

Il y a donc quatre possibilités :

$$\begin{cases} x = 1 \\ x - 2y = 14 \end{cases}, \quad \begin{cases} x = 2 \\ x - 2y = 7 \end{cases}, \quad \begin{cases} x = 7 \\ x - 2y = 2 \end{cases}, \quad \begin{cases} x = 14 \\ x - 2y = 1 \end{cases}.$$

On résout de tête chacun des quatre systèmes :

$$(x = 1, y = -6, 5), \quad (x = 2, y = -2, 5), \quad (x = 7, y = 2, 5), \quad (x = 14, y = 6, 5).$$

Aucun couple n'est un couple d'entiers naturels, donc le problème n'a aucune solution.

Exercice 3 1. Trois entiers consécutifs sont de la forme $n, n + 1, n + 2$, avec n entier (dans \mathbb{Z}), donc leur somme est

$$n + (n + 1) + (n + 2) = 3n + 3 = 3(n + 1).$$

$n + 1$ est un entier, donc $n + (n + 1) + (n + 2)$ est un multiple de 3.

2. Quatre entiers consécutifs sont de la forme $n, n + 1, n + 2, n + 3$, avec n entier, donc leur somme est

$$n + (n + 1) + (n + 2) + (n + 3) = 4n + 6 = 4(n + 1, 5).$$

Or $n + 1, 5$ n'est pas un entier, donc la somme des quatre entiers consécutifs n'est pas un multiple de 4.

Exercice 4 On factorise :

$$n^2 - 2n = n(n - 2).$$

D'après le point 1 de la proposition 1, si 5 divise n , il divise aussi $n(n - 2)$.

Exercice 5 Commençons par rappeler que les nombres pairs sont les multiples de 2.

Pour démontrer le résultat de l'énoncé, on factorise

$$n^2 + n = n(n + 1),$$

puis on distingue deux cas :

- Si n est pair, il est multiple de 2, donc $n(n+1)$ est également multiple de 2 d'après le point 1 de la proposition 1.
- Si n est impair, alors $n+1$ est pair, donc multiple de 2; $n(n+1)$ est donc également multiple de 2 d'après le point 1 de la proposition 1.

Dans tous les cas, $n^2 + n$ est un multiple de 2, donc un nombre pair.

Exercice 6 On rappelle la proposition à démontrer :

Proposition 1.

1. Si $a|b$, alors $a|ub$ pour tout $u \in \mathbb{Z}$.
2. Si $a|b$ et $a|c$, alors $a|(ub + vc)$ pour tous $u, v \in \mathbb{Z}$.

On commence par le point 1. Si $a|b$, on peut écrire $b = k \times a$, où k est un entier. Donc

$$ub = u(k \times a) = (uk) \times a,$$

qui est donc bien un multiple de a (car uk est un entier).

On démontre ensuite le point 2. Par hypothèse $a|b$ et $a|c$, donc on peut écrire $b = k \times a$ et $c = j \times a$, où k et j sont deux entiers. Mais alors

$$ub + vc = u(k \times a) + v(j \times a) = a(uk + vj).$$

Il s'agit bien d'un multiple de a , puisque $uk + vj$ est un entier (du fait que u, v, k, j sont des entiers).

Remarque : Une façon agréable d'énoncer le point 2 de la proposition 1 est de dire que

« Si a divise b et c , alors il divise toute combinaison linéaire à coefficients entiers de b et c »

($ub + vc$ est ce que l'on appelle une combinaison linéaire de b et c).

Exercice 7 On fait un raisonnement par analyse-synthèse :

- **Analyse.** Soit n un entier naturel tel que $n+3$ divise $n+15$.
De façon évidente, $n+3$ divise $n+3$, donc d'après la proposition 1 du cours, $n+3$ divise la combinaison linéaire

$$1(n+15) - 1(n+3) = n+15 - n - 3 = 12.$$

On cherche les solutions avec n entier naturel, donc $n+3$ est supérieur ou égal à 3. Or les seuls diviseurs de 12 supérieurs ou égaux à 3 sont 3, 4, 6 et 12. On a donc quatre possibilités :

$$n+3=3 \quad , \quad n+3=4 \quad , \quad n+3=6 \quad , \quad n+3=12,$$

qui donnent

$$n=0 \quad , \quad n=1 \quad , \quad n=3 \quad , \quad n=9.$$

- **Synthèse.** On vérifie les solutions trouvées :
— Si $n=0$, on a bien $n+3=0+3=3$, qui divise $n+15=0+15=15$.
— Si $n=1$, on a bien $n+3=1+3=4$, qui divise $n+15=1+15=16$.
— Si $n=3$, on a bien $n+3=3+3=6$, qui divise $n+15=3+15=18$.
— Si $n=9$, on a bien $n+3=9+3=12$, qui divise $n+15=9+15=24$.

Conclusion : les entiers naturels n tels que $n+3$ divise $n+15$ sont 0, 1, 3 et 9.

Exercice 8 Soit $n \in \mathbb{N}^*$. On considère l'équation

$$a^2 + 1 = 2^n, \tag{1}$$

d'inconnue $a \in \mathbb{Z}$.

1. • On commence par le cas $n=1$. Comme $2^1=2$, l'équation (1) s'écrit

$$a^2 + 1 = 2.$$

On résout :

$$a^2 = 2 - 1 \iff a^2 = 1 \iff (a = 1 \text{ ou } a = -1).$$

Il y a deux solutions : $a = 1$ et $a = -1$.

- Ensuite le cas $n = 2$. Comme $2^2 = 4$, l'équation (1) s'écrit

$$a^2 + 1 = 4.$$

On résout :

$$a^2 = 4 - 1 \iff a^2 = 3 \iff (a = \sqrt{3} \text{ ou } a = -\sqrt{3}).$$

Or $\sqrt{3} \approx 1,732$ n'est pas un entier, donc il n'y a pas de solution.

2. On suppose à présent que $n \geq 3$.

- (a) On peut écrire

$$2^n = 2^{n-3} \times 2^3 = 2^{n-3} \times 8.$$

Par hypothèse $n \geq 3$, donc $n - 3 \geq 0$, et donc 2^{n-3} est un entier. Il s'ensuit que $2^n = \underbrace{2^{n-3}}_{\text{entier}} \times 8$ est un multiple de 8.

- (b) On raisonne par contraposée¹.

Si a est pair, alors $a = 2k$ avec $k \in \mathbb{Z}$, donc $a^2 + 1 = (2k)^2 + 1 = 4k^2 + 1 = 2(2k^2) + 1$ est impair. D'un autre côté, 2^n est pair (car $n \in \mathbb{N}^*$). Il est donc impossible que $a^2 + 1$ (qui est impair) soit égal à 2^n (qui est pair).

Conclusion : si a est pair, alors il n'est pas solution de (1). Donc par contraposée, si a est solution de (1), alors il est nécessairement impair.

- (c) On suppose que a est impair, donc de la forme $a = 2k + 1$, avec $k \in \mathbb{Z}$. Dans ce cas

$$a^2 - 1 = (2k + 1)^2 - 1 = (2k)^2 + 2 \times 2k \times 1 + 1^2 - 1 = 4k^2 + 4k + 1 - 1 = 4k^2 + 4k = 4(k^2 + k).$$

△ On a utilisé l'identité remarquable

$$(A + B)^2 = A^2 + 2AB + B^2.$$

D'après l'exercice 5, $k^2 + k$ est un nombre pair, donc multiple de 2 : on peut l'écrire $k^2 + k = 2m$, avec $m \in \mathbb{Z}$. Il vient donc finalement

$$a^2 - 1 = 4(k^2 + k) = 4(2m) = 8m,$$

ce qui prouve que $a^2 - 1$ est multiple de 8.

- (d) On suppose que $n \geq 3$ et que a est solution de (1). On a prouvé dans la question 2.(a) que 2^n était un multiple de 8, donc $a^2 + 1$ est un multiple de 8. D'un autre côté, d'après les questions 2.(b) et 2.(c), $a^2 - 1$ est également un multiple de 8. Donc d'après la proposition 1 du cours, la différence

$$2^n - (a^2 - 1) = (a^2 + 1) - (a^2 - 1) = a^2 + 1 - a^2 + 1 = 2$$

est un multiple de 8, ce qui est absurde.

Conclusion : supposant que (1) admet une solution lorsque $n \geq 3$, on aboutit à une absurdité ; c'est donc qu'il n'y a pas de solution dans ce cas-là.

3. D'après la question 1, il y a deux solutions, $a = 1$ et $a = -1$, lorsque $n = 1$. En revanche, il n'y a aucune solution quand $n = 2$. On vient par ailleurs de démontrer qu'il n'y avait aucune solution dans le cas $n \geq 3$. On peut donc conclure avec un tableau :

n	solutions de (1)
1	$a = 1$ et $a = -1$
≥ 2	aucune solution

Exercice 9 • On effectue la division euclidienne de 587 par 13 :

$$\begin{array}{r|l} 587 & 13 \\ - 52 & 45 \\ \hline 67 & \\ - 65 & \\ \hline 2 & \end{array}$$

1. Pour prouver qu'une implication de la forme

Si A alors B,

est vraie, il suffit de prouver que sa contraposée

Si (non B) alors (non A)

est vraie.

$$587 = 45 \times 13 + 2.$$

Remarque : On obtient directement la réponse avec une calculatrice en faisant les calculs $587 \div 13 = 45, \dots$, puis $587 - 45 \times 13 = 2$.

- On effectue la division euclidienne de 10000 par 11 :

$$\begin{array}{r|l} 10000 & 11 \\ - 99 & \\ \hline 100 & \\ - 99 & \\ \hline 1 & \end{array}$$

$$10000 = 909 \times 11 + 1.$$

Exercice 10 1. On suppose que la différence entre a et b est 538, et que le quotient dans la division de a par b est 13, le reste 34. On peut donc écrire

$$\begin{cases} a = b + 538 \\ a = 13b + 34 \end{cases}.$$

Par comparaison,

$$b + 538 = 13b + 34,$$

donc

$$538 - 34 = 13b - b \quad b = \frac{504}{12} = 42.$$

Conclusion : $b = 42$ et $a = b + 538 = 42 + 538 = 580$.

2. Quand on divise n par 29 et par 27, les quotients sont les mêmes et les restes sont respectivement 1 et 25. En notant q les quotients identiques, on obtient le système

$$\begin{cases} n = 29q + 1 \\ n = 27q + 25 \end{cases}.$$

Par comparaison,

$$29q + 1 = 27q + 25,$$

donc

$$29q - 27q = 25 - 1 \quad 2q = 24 \quad q = \frac{24}{2} = 12.$$

Conclusion : $n = 29q + 1 = 29 \times 12 + 1 = 349$.

Exercice 11 On écrit tous les produits d'entiers qui donnent 48 et 84 :

$$\begin{aligned} 48 &= 1 \times 48 \\ &= 2 \times 24 \\ &= 3 \times 16 \\ &= 4 \times 12 \\ &= 6 \times 8. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 84 &= 1 \times 84 \\ &= 2 \times 42 \\ &= 3 \times 28 \\ &= 4 \times 21 \\ &= 6 \times 14 \\ &= 7 \times 12. \end{aligned}$$

Les diviseurs de 48 sont 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24 et 48.

Les diviseurs de 84 sont 1, 2, 3, 4, 6, 7, 12, 14, 21, 28, 42 et 84.

Le PGCD est le plus grand nombre qui divise à la fois 48 et 84. L'examen des listes ci-dessus donne

$$\text{PGCD}(48, 84) = 12.$$

Exercice 12 • On cherche le PGCD de 840 et 144. On effectue les divisions successives :

$$840 = 5 \times 144 + 120,$$

$$144 = 1 \times 120 + 24,$$

$$120 = 5 \times 24 + 0.$$

Le PGCD est le dernier reste non nul :

$$\text{PGCD}(144, 840) = 24.$$

• On cherche le PGCD de 215 et 28. On effectue les divisions successives :

$$215 = 7 \times 28 + 19,$$

$$28 = 1 \times 19 + 9,$$

$$19 = 2 \times 9 + 1$$

$$9 = 9 \times 1 + 0.$$

On a donc $\text{PGCD}(215, 28) = 1$.

Remarque : Comme $\text{PGCD}(215, 28) = 1$, on dit que 215 et 28 sont premiers entre eux – leur seul diviseur positif commun est 1.

Exercice 13 Le côté de chaque dalle (exprimé en cm) doit être un entier qui divise 840 et 350; on veut de plus que ce côté soit le plus grand possible. On cherche donc le PGCD de 840 et 350 :

$$840 = 2 \times 350 + 140,$$

$$350 = 2 \times 140 + 70,$$

$$140 = 2 \times 70 + 0.$$

Conclusion : $\text{PGCD}(840, 350) = 70$, donc chaque dalle a un côté de 70 cm.

De plus, il y a $840 \div 70 = 12$ dalles en longueur; et $350 \div 70 = 5$ dalles en largeur, donc un total de

$$12 \times 5 = 60 \text{ dalles.}$$

Exercice 14 On rappelle la proposition à démontrer :

Proposition 2.

Dans la division euclidienne

$$a = bq + r,$$

(i) si $r \neq 0$, $\text{PGCD}(a, b) = \text{PGCD}(b, r)$;

(ii) si $r = 0$, $\text{PGCD}(a, b) = b$.

1. Dans la situation de la division euclidienne $a = bq + r$, si l'entier k divise a et b , alors d'après la proposition 1 du cours, il divise la combinaison linéaire

$$r = a \times 1 - b \times q.$$

Par conséquent, on a l'implication

$$k \text{ divise } a \text{ et } b \implies k \text{ divise } b \text{ et } r.$$

Réciproquement, si k divise b et r , alors k divise a , puisque $a = b \times q + r \times 1$ (on utilise à nouveau la proposition 1). Il divise donc a et b .

On a finalement l'équivalence

$$k \text{ divise } a \text{ et } b \iff k \text{ divise } b \text{ et } r.$$

2. D'après l'équivalence de la question 1, la liste des diviseurs communs à a et b est la même que la liste des diviseurs communs à b et r . Il s'ensuit que le plus grand élément de chacune des deux listes est le même. Autrement dit :

$$\text{PGCD}(a, b) = \text{PGCD}(b, r).$$

3. Si $r = 0$, alors $a = bq$, donc b est un diviseur de a . Le plus grand diviseur commun à a et b est donc b :

$$\text{PGCD}(a, b) = b.$$

Exercice 15 1. On développe et on réduit :

$$2(3n+2) - 3(2n+1) = 6n+4 - 6n-3 = 1.$$

2. Si un entier naturel k divise à la fois $3n+2$ et $2n+1$, alors il divise la combinaison linéaire $2(3n+2) - 3(2n+1) = 1$. On a donc nécessairement $k = 1$, c'est-à-dire que $3n+2$ et $2n+1$ sont premiers entre eux. La fraction

$$\frac{3n+2}{2n+1}$$

est donc irréductible.

Exercice 16 Pour tout entier $n \geq 1$, on pose $a_n = 3n+1$ et $b_n = 3n-1$.

1. On présente avec un tableau :

n	a_n	b_n	$\text{PGCD}(a_n, b_n)$	1 ^{ers} entre eux
1	4	2	2	non
2	7	5	1	oui
3	10	8	2	non
4	13	11	1	oui

On constate que le PGCD vaut 1 ou 2, suivant que n est pair ou impair. On va le démontrer rigoureusement dans les questions suivantes.

2. Si un entier naturel k divise a_n et b_n , alors il divise la combinaison linéaire

$$a_n - b_n = (3n+1) - (3n-1) = 3n+1 - 3n+1 = 2.$$

Cet entier k ne peut donc être que 1 ou 2.

3. D'après la question précédente, le PGCD de a_n et b_n ne peut être que 1 ou 2. On distingue alors deux cas :
- Si n est impair, alors $3n$ est impair (comme produit de deux nombres impairs – facile à justifier). Donc $3n-1$ et $3n+1$ sont pairs, et leur PGCD est égal à 2.
 - Si n est pair, alors $3n$ est pair (cf le point 1 de la proposition 1). Donc $3n-1$ et $3n+1$ sont impairs; ils ne sont pas divisibles par 2 et leur PGCD est nécessairement égal à 1.

Finalement, on a bien l'équivalence :

$$a_n \text{ et } b_n \text{ premiers entre eux} \iff n \text{ pair.}$$

Exercice 17 Rappelons pour commencer que les premiers nombres premiers sont 2, 3, 5, 7 et 11.

Pour savoir si un nombre n est premier, on essaye de le diviser par tous les nombres premiers jusqu'à \sqrt{n} . D'après la proposition 3 du cours, s'il n'est divisible par aucun d'entre eux, c'est qu'il est premier; sinon, qu'il ne l'est pas. Parfois, il y a un diviseur évident, ce qui nous épargne de fastidieux calculs.

- 425 n'est pas premier, car il est divisible par 5 (diviseur évident).
- $\sqrt{53} = 7, \dots$
53 n'est divisible par aucun des nombres premiers inférieurs à 7 (à savoir 2, 3, 5 et 7), donc il est premier.
- $7777 = 7 \times 1111$, donc 7777 n'est pas premier (7 est un diviseur évident).
- $\sqrt{97} \approx 9, \dots$, et 97 n'est divisible ni par 2, ni par 3, ni par 5, ni par 7. Il est donc premier.
- $\sqrt{143} = 11, \dots$ Le test avec 2, 3, 5 et 7 pourrait laisser penser que 143 est premier; mais ce n'est pas le cas, puisque $143 = 11 \times 13$ (il faut tester jusque 11, et ça ne fonctionne que pour 11).

Exercice 18 On barre les multiples de 2 (sauf 2), puis ceux de 3 (sauf 3), ceux de 5 (sauf 5); et enfin ceux de 7 (sauf 7). Comme $\sqrt{100} = 10$ et que les nombres premiers inférieurs à 10 sont 2, 3, 5 et 7, il ne reste plus dans le tableau que les nombres premiers (cf proposition 3 du cours) – ainsi que 1!

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

Ce tableau est appelé *crible d'Ératosthène*.

Exercice 19 Soit $p > 2$ un nombre premier. En factorisant, l'équation

$$x^2 - y^2 = p \quad (2)$$

se réécrit

$$(x + y)(x - y) = p.$$

Les facteurs $x + y$ et $x - y$ sont des entiers. Or p est premier, donc les quatre seules possibilités de l'écrire comme un produit d'entiers sont

$$p = p \times 1 = 1 \times p = (-p) \times (-1) = (-1) \times (-p).$$

On a donc quatre possibilités :

$$\begin{cases} x + y = p \\ x - y = 1 \end{cases}, \quad \begin{cases} x + y = -p \\ x - y = -1 \end{cases}, \quad \begin{cases} x + y = 1 \\ x - y = p \end{cases}, \quad \begin{cases} x + y = -1 \\ x - y = -p \end{cases}.$$

△ Dans cet exercice, les solutions négatives sont autorisées (on ne se restreint pas aux entiers naturels).

On résout chacun des quatre systèmes en ajoutant membre à membre les deux lignes. Par exemple, pour le premier :

$$x + y + x - y = p + 1 \quad 2x = p + 1 \quad x = \frac{p+1}{2} \quad \text{puis} \quad y = p - x = \frac{2p}{2} - \frac{p+1}{2} = \frac{2p - p - 1}{2} = \frac{p-1}{2}.$$

Conclusion : dans ce cas-là, le couple $x = \frac{p+1}{2}$, $y = \frac{p-1}{2}$ est solution. C'est de plus bien un couple d'entiers, car $p > 2$ étant premier, il est impair, donc $p + 1$ et $p - 1$ sont pairs, et finalement $\frac{p+1}{2}$ et $\frac{p-1}{2}$ sont des entiers.

On résout de la même façon les trois autres systèmes pour obtenir quatre couples solutions :

$$(x = \frac{p+1}{2}, y = \frac{p-1}{2}) \quad , \quad (x = \frac{-p-1}{2}, y = \frac{-p+1}{2}) \quad , \quad (x = \frac{p+1}{2}, y = \frac{-p+1}{2}) \quad , \quad (x = \frac{-p-1}{2}, y = \frac{p-1}{2}).$$