

Contribution à l'étude de « La conjecture de Syracuse »

1. Énoncé de la conjecture (Wikipedia)

En [mathématiques](#), on appelle **suite de Syracuse** une [suite d'entiers naturels](#) définie de la manière suivante : on part d'un nombre entier plus grand que zéro ; s'il est pair, on le divise par 2 ; s'il est impair, on le multiplie par 3 et on ajoute 1. En répétant l'opération, on obtient une suite d'entiers positifs dont chacun ne dépend que de son prédécesseur.

Par exemple, à partir de 14, on construit la suite des nombres : 14, 7, 22, 11, 34, 17, 52, 26, 13, 40, 20, 10, 5, 16, 8, 4, 2, 1, 4, 2... C'est ce qu'on appelle la suite de Syracuse du nombre 14.

Après que le nombre 1 a été atteint, la suite des valeurs (1,4,2,1,4,2...) se répète indéfiniment en un cycle de longueur 3, appelé cycle trivial.

La **conjecture de Syracuse**, encore appelée **conjecture de Collatz**, **conjecture d'Ulam**, **conjecture tchèque** ou **problème $3x + 1$** , est l'hypothèse mathématique selon laquelle la suite de Syracuse de n'importe quel entier strictement positif atteint 1.

En dépit de la simplicité de son énoncé, cette [conjecture](#) défie depuis de nombreuses années les mathématiciens. [Paul Erdős](#) a dit à propos de la conjecture de Syracuse : les mathématiques ne sont pas encore prêtes pour de tels problèmes¹.

2. Bribes et carrefours.

Soit un nombre x . Dans toute suite de Syracuse où il apparaît, il n'a par définition qu'un seul successeur : $x/2$ si x est pair, $(3x + 1)$ si x est impair.

Combien peut-il avoir de prédécesseurs ?

- Un seul s'il est impair, à savoir $2x$
- Un ou deux s'il est pair, à savoir d'une part $2x$, d'autre part éventuellement un nombre y tel que $x = 3y + 1$. Mais pour cela il faut que y soit impair, soit $2n + 1$, et donc $x = 3(2n+1) + 1$, soit $x = 6n + 4$

En conclusion seuls les nombres de la forme **$6n + 4$** peuvent avoir 2 prédécesseurs, appelons les « **carrefours** ». Ils forment une **congruence** : tous les carrefours sont congrus à 4 modulo 6.

Appelons « **bribe** » une séquence de nombres d'une suite de Syracuse compris entre un carrefour (inclus dans la bribe) et le carrefour suivant.

Une bribe est donc définie par un nombre $(6n+4)$ et tous ses successeurs, jusqu'à ce qu'on tombe sur un autre carrefour.

Chaque nombre autre que $(6n+4)$ n'appartient qu'à une seule bribe (sauf les cas des multiples de 6, voir plus loin « pseudo-bribes »).

Tout nombre impair a pour successeur un carrefour, et pour prédécesseur un nombre pair.

Toute suite de Syracuse est une succession de bribes (ou pseudo-bribes).

Chaque bribe (sauf terminale) est suivie d'une autre bribe.

Exemples de suites de Syracuse avec mise en évidence des bribes (les carrefours sont en jaune) :

3	10	5	16	8	4	2	1												
4	2	1																	
5	16	8	4	2	1														
6	3	10	5	16	8	4	2	1											
7	22	11	34	17	52	26	13	40	20	10	5	16	8	4	2	1			
8	4	2	1																
9	28	14	7	22	11	34	17	52	26	13	40	20	10	5	16	8	4	2	1
10	5	16	8	4	2	1													
11	34	17	52	26	13	40	20	10	5	16	8	4	2	1					

Le nombre 26 par exemple, ne peut jamais apparaître que dans la bribe (52, 26, 13)

Liste des premières bribes (la première colonne donne les valeurs successives de $(6n+4)$)

4	2	1	4
10	5	16	
16	8	4	
22	11	34	
28	14	7	22
34	17	52	
40	20	10	
46	23	70	
52	26	13	40
58	29	88	
64	32	16	
70	35	106	

La première question à se poser est celle-ci : étant donné un nombre x , peut-on affirmer que dans la suite de Syracuse partant de ce nombre, on tombe forcément sur un carrefour ? Si ce n'était pas le cas, alors la conjecture de Syracuse serait fautive (on ne peut arriver à la valeur 1 qu'en passant par le carrefour 4).

Or cela est évident ; il suffit de tomber sur un nombre impair (puisque tout nombre impair a pour successeur un carrefour). Si on a une suite de nombre pairs, on tombe forcément sur un nombre impair dans la suite de Syracuse avec la division par 2 (ou la valeur 1).

Carrefours (a) et suivants S(a)

a	S(a)	
4	4	
10	16	
16	4	
22	34	
28	22	
34	52	
40	10	
46	70	
52	40	
58	88	
64	16	
70	106	
76	58	
82	124	
88	22	
94	142	
100	76	
106	160	
112	28	
118	178	
124	94	
130	196	
136	34	
142	214	
148	112	
154	232	
160	40	

les couleurs correspondent aux 3 cas suivants

- █ $a = 4 + 6(2n+1)$ $S(a) > a$
- █ $a = 4 + 6 \cdot 2 \cdot 2n$ $S(a) < a$
- █ $a = 4 + 6 \cdot 2(2n+1)$ $S(a) < a$

On pourrait compléter cette liste avec les **ascendants** : chaque carrefour ayant exactement 2 ascendants, dont l'un est forcément son quadruple, (car $4(4+6N) = 4 + 12 + 24N$ est un carrefour) de couleur jaune.

La liste ci-dessus représente le début de la **liste complète des bribes**, définies par leur carrefour initial et leur carrefour final.

3. Composition des bribes.

Une bribe est définie par un carrefour A, suivi d'un ou plusieurs nombres jusqu'au carrefour suivant B : A x y ... B

Démontrons qu'on ne peut avoir en fait que les configurations suivantes (en désignant par P un nombre pair et par I un nombre impair) :

1. A P B
2. A I B
3. A P I B

En effet, si le nombre précédant B est pair : $B = 4 + 6N \rightarrow P = 8 + 12N \rightarrow$ ce nombre n'est pas un carrefour \rightarrow le nombre précédant P est $16 + 24N = 4 + 6X$, c'est un carrefour, cas 1.

Si le nombre précédent B est impair le double de $I = 1 + 2N$ peut être :

$$2 + 4N = 6X, \text{ ou } 6X + 2, \text{ ou } 6X + 4$$

- $6X + 4$: c'est un carrefour, on est donc dans le cas 2. A I B
- $6X + 2$: le nombre précédent est $12X + 4$ qui est un carrefour, on est donc dans le cas 3. A P I B
- $6X$: dont le nombre précédent est $12X$, dont le nombre précédent est $24X$ et ainsi de suite : dans ce cas on n'atteint jamais un carrefour, on peut prolonger cette suite à l'infini.

Ce cas se produit avec tous les multiples de 6.

Si on considère la suite (12 - 6 - 3 - 10), on ne peut trouver la bribe (A ... 12 - 6 - 3), puisque le carrefour A n'existe pas, on n'obtient qu'une suite infinie de multiples de 6.

En conclusion, les bribes n'appartiennent qu'aux cas 1 à 3 :

1) A P B	$B = A/4$	$B < A$	$A = 4 B$
2) A I B	$B = 3 A/2 + 1$	$B > A$	$A = 2 / 3 (B - 1)$
3) A P I B	$B = 3 A/4 + 1$	$B < A$	$A = 4 / 3 (B - 1)$

Remarque 1 :

Il y a une bribe particulière : celle ayant pour origine le carrefour 4 . C'est la bribe 4 - 2 - 1 - 4 . Nous l'appellerons bribe terminale. On constate aisément que c'est la seule pour laquelle on a $A = B$

Remarque 2 :

Tout nombre autre que $(6N+4)$ appartient à une bribe et une seule, avec le cas particulier des **multiples de 6, qui appartiennent à une pseudo-bribe infinie** comme

par exemple (..... 72 – 36 – 18 – 9 – 28) : les multiples de 6 ne sont pas des carrefours, et on ne trouve pas de carrefours dans leurs ascendants.

Une telle bribe infinie se termine forcément par un impair multiple de 3, et inversement tout multiple de 3 a pour ascendant un multiple de 6 et donc appartient à une bribe infinie. Donc les vraies bribes, partant d'un carrefour A et aboutissant à un carrefour B **ne contiennent aucun multiple de 3.**

Donc, les nombres constituant une bribe (hors les extrémités) sont de la forme **$6N + 1$, ou $6N + 2$, ou $6N + 5$.**

Remarque 3 :

Etudions le contenu des bribes selon qu'elles renferment **$6N + 1$, $6N + 2$, ou $6N + 5$.**

Avec $6N+1$, on a la suite suivante, en calculant son successeur et ses prédécesseurs :

(b1) : $24N+4 \rightarrow 12N+2 \rightarrow 6N+1 \rightarrow 18N+4$ de la forme **A P I B**

Avec $6N+5$, on a la suite :

(b5) : $6(2N+1)+4 \rightarrow 6N+5 \rightarrow 6(3N+2)+4$ de la forme **A I B**

Avec $6N+2$, il faut distinguer les cas où $N = 2p$ ou $N=2p+1$, conduisant à :

(b2) : $12N+4 \rightarrow 6(2p+1)+2 \rightarrow 6p+4$ de la forme **A P B**

$12N+4 \rightarrow 12p+2 \rightarrow 6p+1 \rightarrow 18p+4$

Ce dernier cas est le même que le premier cas, il n'y a donc que 3 formes de bribes, (b1), (b2), et (b5).

Les cas (b1) et (b2) conduisent à une diminution ($B < A$), et le cas **(b5)** conduit à une augmentation ($B = 3 A/2 + 1$).

On peut dire également que **pour qu'une bribe partant de $6N+4$ progresse ($B > A$), il faut et il suffit que N soit impair.**

Enfin, en utilisant la notation binaire des nombres, l'origine A s'écrit :

- dans le cas (b1) : $A = \dots\dots\dots 100 \rightarrow \mathbf{A P I B}$ correspond à la couleur bleue
- dans le cas (b2) : $A = \dots\dots\dots 000 \rightarrow \mathbf{A P B}$ correspond à la couleur jaune
- dans le cas (b5) : $A = \dots\dots\dots 10 \rightarrow \mathbf{A I B}$ correspond à la couleur rouge

Remarque 4 :

La liste des bribes définit également l'ensemble des suites de Syracuse : étant donné un nombre n quelconque, il suffit de trouver le carrefour $C1$ qui suit n (c'est $3n+1$ si n est impair, si n est pair il suffit de le diviser C par 2 jusqu'à ce qu'on trouve un impair). Le carrefour $C2$ est le suivant de $C1$ dans cette liste, le carrefour $C3$ est le suivant de $C2$ et ainsi de suite.

Conformément à ce qui précède, **une suite de Syracuse ne contient aucun multiple de 3**, sauf le cas échéant sa valeur initiale, et ses successeurs immédiats (36 - 18 - 9 - 28).

Les possibilités d'une suite de Syracuse sont les suivantes :

- Convergence vers 1
- Boucles, ou cycles (on retombe sur un carrefour Cx qu'on a déjà rencontré)
- Divergence : la valeur de Cx tend vers l'infini. :

Remarque 5 probabiliste :

Pour aller du carrefour A au carrefour B, on a donc 3 possibilités

1. A P B
2. A I B
3. A P I B

Le tableau ci-dessous donne les probabilités d'occurrence pour ces 3 probabilités, ainsi que la valeur de B obtenue :

Cas	Composition	Probabilité	Valeur de B
1	A P B	0.25	$A/4$
2	A I B	0.5	$3A/2+1$
3	A P I B	0.25	$3A/4+1$

Les probabilités sont bien celles indiquées : en effet $A=4 + 6N$, donc $A/2 = 2 + 3N$ qui est pair ou impair en même temps que N , donc la probabilité du cas 2 (A I ..) est 0.5, et celle des cas 1 ou 3 (A P ..) est de 0.5.

Pour ces cas 1 ou 3, on a $N = 2M$, $A/2 = 2 + 6M$, $A/4 = 1 + 3M$, qui est pair ou impair à l'opposé de M , d'où les probabilités de 0.25 pour les cas 1 et 3.

Finalement, la valeur probable de B est égale à A multiplié par un coefficient ω ,

avec $\omega=0.25$ dans le cas 1, $\omega = 1.5 + \epsilon$ dans le cas 2, et $\omega = 0.75 + \epsilon$ dans le cas 3, et donc la valeur probabiliste de ω est (en négligeant les ϵ) :




$$\omega = 0.25^{0.25} \times 1.5^{0.5} \times 0.75^{0.25}$$

$$= 0,70710 \times 1,224744 \times 0,930604 = 0,80592$$

On observe donc une décroissance rapide des valeurs successives des carrefours. Cela ne prouve pas la convergence des suites, mais c'est un encouragement à la recherche de sa démonstration !

Résumé :

Pour une bribe A-B, avec $A = 6N_A + 4$ et $B = 6N_B + 4$, on a les 3 cas suivants

Cas-couleur	A en binaire	N_A	Bribe	B	N_B
b1	.....100	$4p$	A P I B	$3 A/4 + 1$	$3 N_A /4 = 3p$
b2	.....000	$2(2p+1)$	A P B	$A/4$	$(N_A -2)/4 = p$
b5	..... 10	$2p+1$	A I B	$3 A/2 + 1$	$(3N_A +1)/2 = 3p+2$

Etude des ascendants d'un carrefour.

Un carrefour B a 2 ascendants, il est le terminal de 2 bribes de type b1, b2 ou b5. Or, le nombre $4B$ est évidemment un ces 2 ascendants, donc les 2 bribes arrivant en B sont (b1 et b2), ou (b2 et b5)

Examinons le cas (b1, b2), correspondant aux bribes $A_1 - B$ et $A_2 - B$

D'après le tableau ci-dessus, on a $B = A_2/4$ et $B = 3A_1/4 + 1$

D'où **$A_2 = 3A_1 + 4$**

Dans le cas (b5, b2), correspondant aux bribes $A_5 - B$ et $A_2 - B$

on a $B = A_2/4$ et $B = 3A_5/2 + 1$

D'où **$A_2 = 6A_5 + 4$**

4. Graphe des carrefours.

A part le cas particulier de la bribe (4 -2 -1 -4) qui forme une boucle, il faut démontrer qu'il n'y a pas d'autres boucles possibles, et qu'il n'y a pas de divergence des suites de Syracuse.

Etudier de telles suites revient à étudier la suite des bribes, c'est-à-dire les cheminements de carrefour en carrefour.

Considérons le **graphe orienté** dont les sommets sont les carrefours et dont les arcs sont définis ainsi : il y a un arc de A vers B si B est le successeur de A, c'est-à-dire s'il y a une bribe (A...B).

C'est un graphe orienté très particulier, car **chaque sommet a un descendant et deux ascendants, sauf les sommets origine d'une pseudo-bribe, qui n'ont qu'un ascendant.**

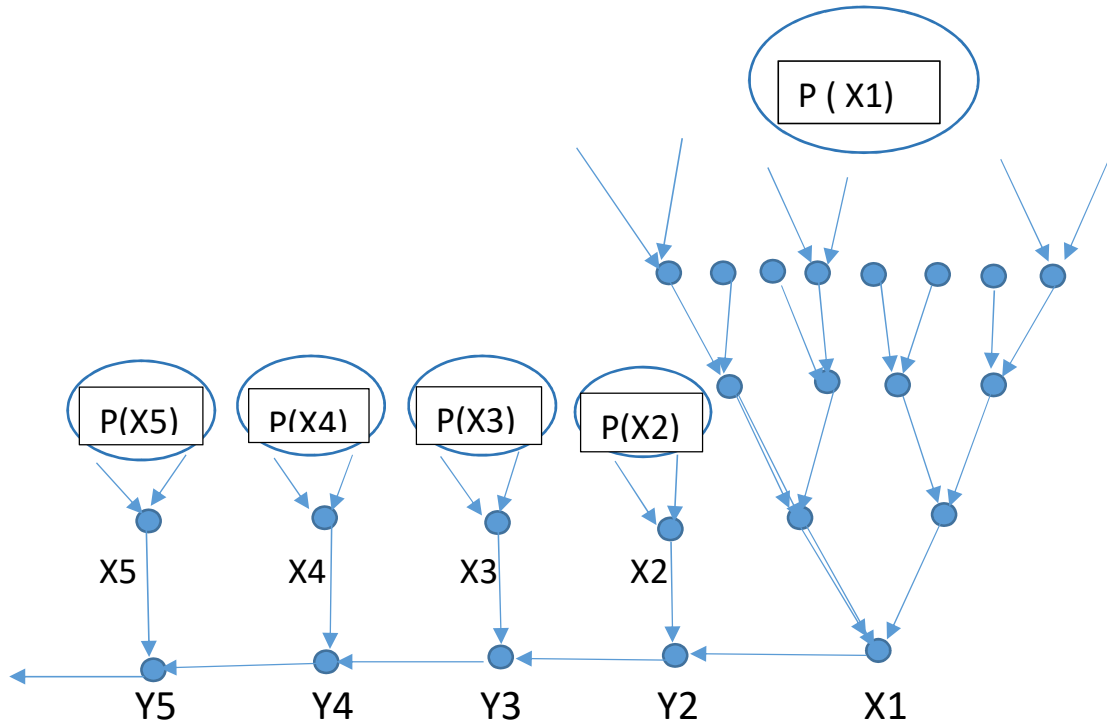
Tous les nombres d'une pseudo-bribe (sauf le carrefour origine de cette pseudo-bribe) sont des multiples de 3, et réciproquement tout multiple de 3 appartient à une pseudo-bribe.

Etant donné un sous-ensemble S de carrefours, on appelle **parentèle** de S l'ensemble des carrefours qui ont parmi leurs descendants un sommet de S. La parentèle P de S comprend tous les sommets de S, tous leurs ascendants directs, tous les ascendants de leurs ascendants et ainsi de suite. Il s'agit d'un **ensemble infini** : en effet s'il n'y avait qu'un nombre fini X de sommets dans la parentèle P de S, comme ces sommets n'ont qu'un descendant, les X sommets auraient au maximum X ascendants, donc il y aurait au moins X sommets extérieurs à P ayant pour descendants un sommet de S, donc ils feraient partie de P, ce qui est contraire à l'hypothèse initiale.

Regardons ce qui se passe quand S se réduit à un seul carrefour.

Ascendants et descendants d'un carrefour X1

Considérons le sous-graphe constitué de tous les ascendants et descendants d'un carrefour X1



Les ascendants de X1 forment sa parentèle $P(X1)$

Soit Y2 le descendant de X1, Y3 le descendant de Y2 etc.

Soit X2 l'autre ascendant de Y2, X3 l'autre ascendant de Y3 etc.

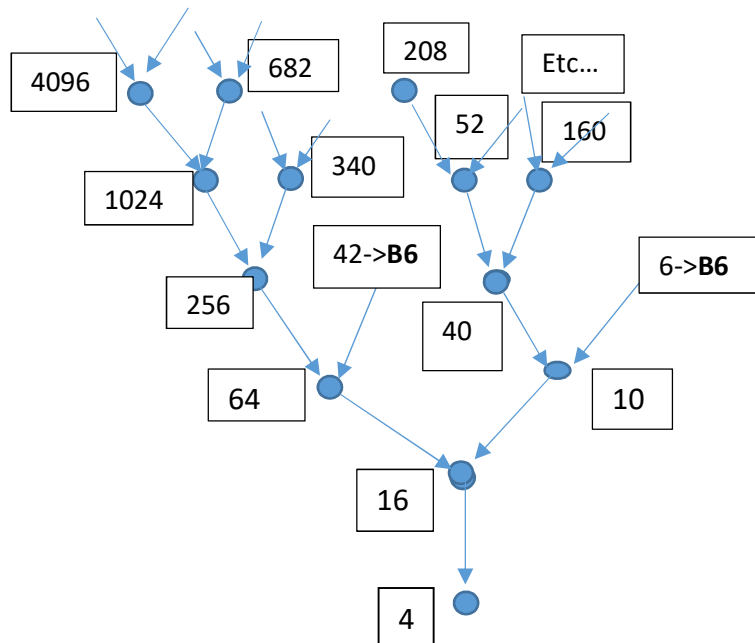
$P(X2)$ est la parentèle de X2

 $P(X5)$ est la parentèle de X5 etc

Etudions les différentes possibilités d'évolution de ce sous-graphe contenant l'ensemble des ascendants et descendants de X1. Elles dépendent de la suite $Y2 - Y3 - \dots - Y_n$

- Ou bien elle converge, c'est-à-dire que $Y_n = 4$ Nous obtenons la **famille 1**
- Ou bien elle diverge, Y_n augment indéfiniment sans jamais être égal à une valeur précédente du sous-graphe : c'est la **famille 2**
- Ou bien elle boucle, c'est-à-dire que Y_n est égal à un des Y précédents, ou un des X précédents, ou un sommet de leurs parentèles : c'est la **famille 3**

La famille 1 se termine par $Y_k - 16 - 4$. Donc la famille 1 est constitué de la parentèle de 4.



B6 : Pseudo-Bribe multiples de 6
En l'occurrence les suites
6-12-24-48...
et 42-84-128-...

Les pseudo-bribes ne font pas partie du graphe des carrefours.

Les nombres tels que 10 et 64 n'ont qu'un seul ascendant.

La famille 2 qui diverge (si elle existe) ne contient par définition aucune boucle, Toutes les parentèles $P(X_j)$ sont étrangères les unes aux autres (elles ne contiennent aucun sommet d'une autre parentèle). Les sommets de cette famille 2 ne font pas partie de la parentèle de 4.

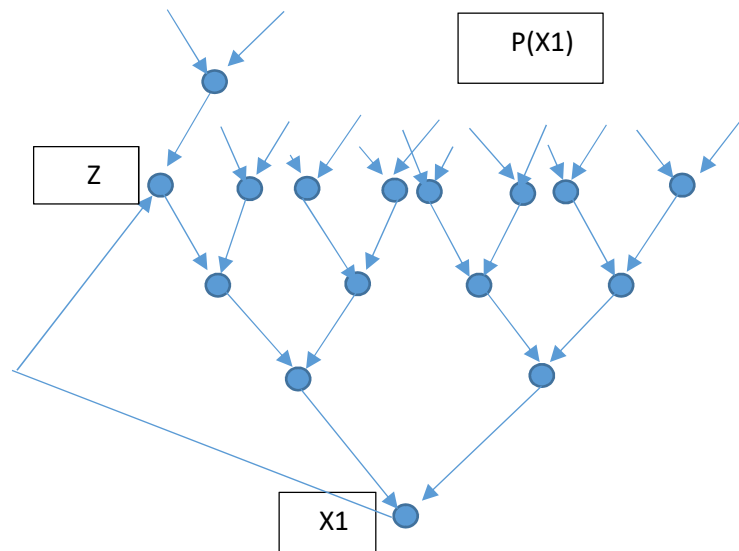
La famille 3 se termine par une boucle (si elle existe), donc Y_n se retrouve dans une des parentèles X_j , ou bien dans un autre Y_k (sans que cela soit déjà arrivé avec $Y_j, j < n$).

Examinons d'abord le cas où $Y_n = Y_k$ ($k < n$). Mais dans ce cas, ses ascendants X_n et Y_{n-1} sont les mêmes que les ascendants de Y_k soit X_k et Y_{k-1} , donc on aurait $Y_{n-1} = Y_{k-1}$ ou $Y_{n-1} = X_k$, donc Y_n ne serait pas le premier à se répéter. Ce cas est donc impossible.

Si maintenant Y_n est égal à X_j ($j < n$) ou à un des sommets de $P(X_j)$, alors son ascendant Y_{n-1} se retrouve dans $P(X_j)$ donc Y_n ne serait pas le premier à avoir cette caractéristique.

Finalement la seule possibilité de boucle est celle-ci : Y_1 fait partie de $P(X_1)$, donc X_1 a pour descendant l'un de ses ascendants.

- **Famille 3** : le successeur de X1 est Z, qui fait partie de P(X1)



Les sommets de P(X1) sont bien entendu absents de la famille 1.

Finalement :

- Si la parentèle de 4 inclut tous les carrefours, c'est-à-dire toutes les valeurs $4+6N$, alors la conjecture de Syracuse est vérifiée
- Sinon, la conjecture est fausse.

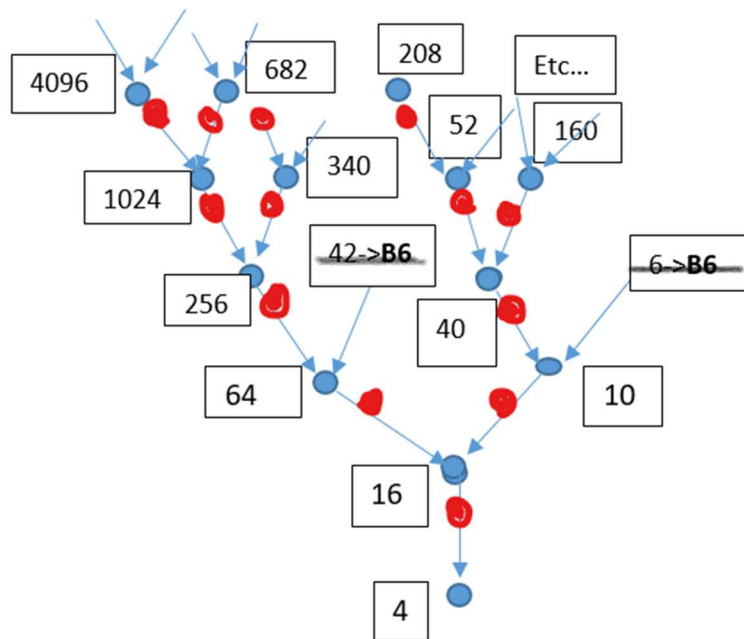
On pouvait dire aussi plus simplement :

- Si le graphe des carrefours n'est constitué que d'une seule composante connexe, la conjecture de Syracuse est vérifiée.
- S'il comprend plusieurs composantes connexes, elle est fausse.

5. Graphe filial.

Chaque carrefour $6N+4$ a pour successeur $3N+2$. Réciproquement chaque nombre $3N+2$ est le fils d'un carrefour. Considérons le graphe dont les sommets sont les nombres $3N+2$, 2 sommets étant reliés par un arc si leurs pères respectifs sont 2 carrefours dont l'un est le descendant de l'autre.

Ce graphe est isomorphe au graphe des carrefours. Les points rouges sont les sommets $3N+2$ du graphe filial qui se superpose au graphe des carrefours.



Remarques :

Reprenons les 3 bribes possibles et étudions la congruence modulo 3 des nombres qui la composent :

Bribe A P B :

P est de la forme $3n+2$

A et B sont de la forme $6n+4$, donc ne sont pas multiples de 3 (évident), ni de la forme $3p+2$, car on aurait $6n+4=3p+2$, soit $6n+2=3p+2$ (impossible) donc $6n+4=3p+1$, soit $p=2n+1$

Bribe A I B : idem que le précédent donc de la forme $(3p+1), (3n+2), (3q+1)$

Bribe A P I B : de la forme : $(3p+1), (3n+2), (?), (3q+1)$

Or on a $I=P/2$, donc $P=3n+2 = 3(2s) + 2$, donc $I = 3s+1$











Les 3 formes de bribes sont donc :

Bribes	Sommet 1	Sommet 2	Sommet 3	Sommet 4
A P B	$3p+1$	$3n+2$	$3q+1$	
A I B	$3p+1$	$3n+2$	$3q+1$	
A P I B	$3p+1$	$3n+2$	$3s+1$	$3q+1$





On peut constater qu'aucun multiple de 3 n'est présent dans une brise, ils figurent tous dans les pseudo-bribes infinies, ce que l'on savait déjà : **la suite de Syracuse de tout nombre N ne comprend aucun multiple de 3, sauf peut-être si N est multiple de 3.**

Il semble aussi qu'il y ait une surreprésentation des nombres congrus à 1 (modulo 3) par rapport aux nombres congrus à 2, ce qui est étrange. Par exemple, dans la suite de Syracuse d'un nombre N, il y a plus de nombres congrus à 1 (modulo 3) que de nombre congrus à 2, et ce quel que soit N.

Reprenons sous une autre forme le tableau ci-dessus, selon les valeurs de n, le premier sommet valant $6n+4$:

Bribes	A P B : $n=2(2p+1)$	A I B : $n=2p+1$	A P I B : $n=4p$
Sommet 1	 $12(2p+1)+4$	 $6(2p+1)+4$	 $24p+4$
Sommet 2	 $6(2p+1)+2$	 $6p+5$	 $12p+2$
Sommet 3	 $6p+4$	 $6(3p+2)+4$	 $6p+1$
Sommet 4			 $18p+4$

Avec les couleurs

Couleur	Sommet de la forme
	$6a+4$
	$6a+2$
	$6a+5$
	$6a+1$

Tous les nombres écrits sous la forme $6a+b$ ont ainsi leur place précise dans les bribes, sachant qu'il manque dans ce tableau les nombres de la forme $6a$ et $6a+3$: les nombres $6a$ sont les sommets des pseudo-bribes infinies, aboutissant au nombre impair $3(2a+1) = 6a+3$

6. Etude des descendants.

Etudions le descendant du carrefour $X = 4 + 6N$, en fonction des valeurs de N

Tout N peut s'écrire $N = 2^q (2p+1)$

Avec $q = 0, 1, 2, \dots$

Et $p = 0, 1, 2, \dots$

Si $q=0$, on sait, d'après la remarque 3 du paragraphe 3, que le descendant de X est plus grand que X . En effet, $X = 4 + 6(2p+1)$, le successeur de X est $2+3(2p+1) = 6p+5$, dont le successeur (qui est donc le descendant de X) est $18p+16$, soit le carrefour $4+6(3p+2)$, soit

$$B = 3A/2 + 1$$

Si $q>0$, et q pair, on a $B = A/4$

Si $q>0$ et impair, on a $B = 3A/4 + 1$

(à suivre)

