

Fonctions de Parking Classiques et Rationnelles

Tessa Lelièvre-Osswald

Encadrant : Matthieu Josuat-Vergès

Equipe : IRIF - Pôle Combinatoire

14 août 2020

Contexte général

La *combinatoire* est un domaine des mathématiques et de l'informatique théorique étudiant les ensembles finis par leur énumération et leur comptage. Se divisant en plusieurs branches, nous abordons dans ce rapport deux branches principales : la *combinatoire énumérative*, domaine le plus classique, basé sur le dénombrement ; et la *combinatoire bijective*, consistant à déduire une égalité entre les résultats de comptage de deux classes combinatoires qui sont en bijection.

On s'intéresse ici en particulier à des objets combinatoires appelés *fonctions de parking*. Introduites en 1966 par Konheim et Weiss ([1]), les fonctions de parking sont les séquences d'entiers positifs dont le nombre d'éléments *inférieurs ou égaux* à i est *supérieur ou égal* à i pour tout entier i entre 1 et n .

Leur appellation vient du problème de hachage suivant : soient un parking contenant n places numérotées de 1 à n , et n voitures à garer. A chaque voiture i est associé un entier a_i , indiquant que cette voiture doit être garée à une place dont le numéro est supérieur ou égal à a_i . La séquence (a_1, \dots, a_n) est alors appelée fonction de parking si et seulement si il existe une configuration de garage des n voitures respectant les contraintes données par les entiers a_i .

Longuement étudiées, les principaux résultats de comptage émanent des travaux de Stanley ([2], [3]), Kreweras ([4]), et Edelman ([5]). Plus récemment, la notion de fonction de parking *rationnelle* a été introduite et étudiée – entre autres – dans les travaux d'Armstrong, Loehr et Warrington ([6]), ainsi que de Bodnar ([7]). Bien que les travaux mentionnés ci-dessus concernent principalement le comptage des fonctions de parking et des relations de leurs posets, ces dernières ont des applications dans de nombreux domaines tels que l'analyse et la géométrie.

Problèmes étudiés

Dans cet article, nous abordons deux principaux problèmes.

Premièrement, à notre connaissance, les posets proposés jusque là pour les fonctions de parking dépendent tous de bijections entre les fonctions de parking et une autre structure combinatoire, pour laquelle un poset était déjà défini. Cela rend la définition d'une relation de couverture assez lourde, et rajoute des étapes au processus de comparaison.

Ensuite, l'extension au cas rationnel étant en plein essor dans les travaux les plus récents, de nombreux concepts restent à redéfinir en dehors du cas classique.

Contribution proposée

Nous présentons ici un nouveau poset pour les fonctions de parking, dans le cas classique ainsi que dans le cas rationnel. Ainsi, nous introduisons une relation de couverture plus élégante, définie sans structure intermédiaire. De plus, celle-ci est en bijection avec une relation naturelle que nous définissons sur les chemins de Dyck, qui sont une structure élémentaire de la combinatoire.

Enfin, nous reprenons la notion d'*arbres de parking* donnée par Delcroix-Oger, Josuat-Vergès et Randazzo ([8]), afin d'en donner une version rationnelle.

Pour ces deux contributions, le cas rationnel est traité pour toute paire d'entiers premiers entre eux – sans se limiter au cas $a < b$ comme il a pu être fait dans certains travaux.

Une version longue de ce rapport est disponible ici¹, ainsi que l'encodage en Sage des principales notions abordées dans les références 1 à 8 et des constructions que nous présentons.

Arguments en faveur de sa validité

Les posets introduits dans le cas classique sont à l'origine de nos deux résultats principaux.

Dans le cas des fonctions de parking *primitives*, nous exhibons une preuve du Théorème 5, qui donne le nombre d'intervalles dans le poset. Quant à son équivalent pour le cas non-primitif, nous établissons une Conjecture sur le nombre d'intervalles, vérifiée sur les cas $n = 1, \dots, 8$.

Bilan et perspectives

En conclusion, nous avons maintenant des posets définis de manière directe pour les quatre types de fonctions de parking : classiques, classiques primitives, rationnelles, et rationnelles primitives.

Par la suite, il sera nécessaire de trouver une preuve de la Conjecture, ou bien si elle doit être réfutée, d'exhiber une formule comptant les intervalles dans notre poset des fonctions de parking classiques. Quant au cas rationnel, il faudra également trouver des formules exprimant le nombre de relations.

Enfin, l'on pourrait également vouloir étudier les relations de couvertures sur les arbres de parking rationnels.

1. github.com/tessalsifi/ParkingFunctions

Table des matières

1	Introduction	3
1.1	Fonctions de Parking	3
1.2	Chemins de Dyck	4
2	Un poset pour les fonctions de parking classiques	5
2.1	Le cas primitif	5
2.2	Le cas général	7
3	Un poset pour les fonctions de parking rationnelles	10
3.1	Fonctions de parking rationnelles	10
3.2	Chemins de Dyck rationnels	10
3.3	Posets rationnels	11
4	Arbres de parking rationnels	14
5	Conclusion	19
A	Exemples pour l'Introduction	20
B	Exemples pour la Partie 2	22
C	Exemples pour la Partie 3	25

1 Introduction

1.1 Fonctions de Parking

En annexe A, les exemples 1 à 4 illustrent les définitions et théorèmes de cette section.

Définition 1 (Fonction de Parking). *Une fonction de parking est une séquence d'entiers positifs (a_1, a_2, \dots, a_n) dont le tri croissant (b_1, b_2, \dots, b_n) respecte la condition suivante : $b_i \leq i$ pour tout $i \leq n$.*

En d'autres termes, $\#\{i \mid a_i \leq k\} \geq k \ \forall k \leq n$.

On note \mathcal{PF}_n l'ensemble des fonctions de parking de longueur n .

Théorème 1 (Konheim et Weiss, 1966). *Soit pf_n le cardinal de \mathcal{PF}_n . Nous avons*

$$pf_n = (n+1)^{n-1}$$

Définition 2 (Fonction de Parking Primitive). *Une fonction de parking (a_1, a_2, \dots, a_n) est dite primitive si elle est déjà triée en ordre croissant.*

On note \mathcal{PF}'_n l'ensemble des fonctions de parking primitives de longueur n .

Théorème 2 (Stanley, 1999). *Soit pf'_n le cardinal de \mathcal{PF}'_n . Nous avons*

$$pf'_n = \frac{1}{n+1} \binom{2n}{n}$$

Ce nombre est le n^e nombre de Catalan $Cat(n)$.

1.2 Chemins de Dyck

En annexe A, les exemples 5 à 8 illustrent les définitions et théorèmes de cette section.

Notation. *On note par $|w|_s$ le nombre d'occurrences du symbole s dans le mot w .*

Définition 3 (Mot de Dyck). *Un mot de Dyck est un mot $w \in \{0, 1\}^*$ tel que :*

- *pour tout suffixe w' de w , $|w'|_1 \geq |w'|_0$.*
- *$|w|_0 = |w|_1$.*

Un mot de Dyck de longueur $2n$ peut être représenté par un *chemin* allant du point $(0, 0)$ au point (n, n) , et restant au dessus de l'axe $y = x$, appelé *chemin de Dyck* :

- Chaque 1 correspond à un *pas Nord* \uparrow .
- Chaque 0 correspond à un *pas Est* \rightarrow .

On note \mathcal{D}_n l'ensemble des mots de Dyck de longueur $2n$.

Théorème 3 (André, 1887). *Soit d_n le cardinal de \mathcal{D}_n . Nous avons*

$$d_n = \frac{1}{n+1} \binom{2n}{n}$$

Définition 4 (Mot de Dyck Décoré). *Un mot de Dyck décoré est un mot $w \in \{0, \dots, n\}^*$ tel que :*

- *pour tout suffixe w' de w , $|w'|_{\neq 0} \geq |w'|_0$.*
- *$|w|_0 = |w|_{\neq 0}$.*
- *pour tout $i \in \{1, \dots, n\}$, w contient exactement une occurrence de i .*
- *si $w_i \neq 0$ et $w_{i+1} \neq 0$, alors $w_i < w_{i+1}$. Autrement dit, les labels de pas Nord consécutifs doivent être croissants.*

Un mot de Dyck décoré de longueur $2n$ peut être représenté par un *chemin* allant du point $(0, 0)$ au point (n, n) , où chaque pas North est associé à un label :

- Chaque $i \neq 0$ correspond à un *pas Nord* \uparrow de label i .
- Chaque 0 correspond à un *pas Est* \rightarrow .

Ces chemins sont appelés *chemins de Dyck décorés*.

On note \mathcal{LD}_n l'ensemble des mots de Dyck décorés de longueur $2n$.

Théorème 4. *Soit ld_n le cardinal de \mathcal{LD}_n . Nous avons*

$$ld_n = (n+1)^{n-1}$$

2 Un poset pour les fonctions de parking classiques

2.1 Le cas primitif

Les exemples 9 à 12 donnés en annexe B illustrent les propositions, définitions et théorèmes de cette section.

Proposition 1. *Puisque \mathcal{PF}'_n et \mathcal{D}_n ont le même cardinal, nous pouvons créer une bijection entre les fonctions de parking classiques primitives de longueur n et les mots de Dyck de longueur $2n$.*

Démonstration.

- $\mathcal{PF}'_n \rightarrow \mathcal{D}_n$: Soit $f = (a_1, \dots, a_n) \in \mathcal{PF}'_n$ une fonction de parking classique primitive. Pour tout $i \in \{1, \dots, n\}$, notons l_i le nombre d'occurrences de i dans f . Le mot de Dyck correspondant sera alors $\underbrace{1 \dots 1}_l 0 \underbrace{1 \dots 1}_l 0 \dots \underbrace{1 \dots 1}_l 0$.
- $\mathcal{D}_n \rightarrow \mathcal{PF}'_n$: Soit $w \in \mathcal{D}_n$ un mot de Dyck. Considérons sa représentation sous la forme d'un chemin de Dyck. Notons s_i l'abscisse du i^e pas Nord. On pose alors $a_i = s_i + 1$. La fonction de parking primitive correspondante sera ainsi (a_1, \dots, a_n) .

□

Nous proposons maintenant des relations de couverture pour ces deux ensembles, telles que les posets ainsi créés soient isomorphes, et que l'un puisse être obtenu en appliquant la bijection ci-dessus à l'autre.

Définition 5 (\succ_d). *Soient w et w' deux mots de Dyck de longueur $2n$. On dit que w couvre w' , noté $w \succ_d w'$, s'il existe deux mots w_1 et w_2 tels que :*

- $w = w_1 0 1 w_2$
- $w' = w_1 1 0 w_2$

Remarque. *Si $w_1 \succ_d w_2$, alors le chemin de Dyck correspondant à w_2 est au dessus de celui correspondant à w_1 , et La différence entre les deux chemins est un carré de côté 1.*

Définition 6 (Chemins de Dyck Imbriqués). *Deux chemins de Dyck w_1 et w_2 sont dits imbriqués si w_1 est égal à w_2 ou au dessus de w_2 .*

On déduit donc la proposition suivante de la remarque précédente.

Proposition 2. *IS'il existe une séquence $w_1 \succ_d w_2 \succ_d w_3 \succ_d \dots \succ_d w_k$ avec $k \geq 0$, alors w_1 et w_k sont imbriqués.*

Cette relation de couverture engendre notre poset pour \mathcal{D}_n . Ainsi, le poset contient l'intervalle $[w_1; w_2]$ si et seulement si w_1 et w_2 sont imbriqués.

On définit maintenant la relation bijective sur les fonctions de parking. Celle-ci sera la même pour les 4 types de fonctions de parking (classiques, classiques primitives, rationnelles, et rationnelles primitives).

Définition 7 (\succ). *Soient f et g deux fonctions de parking. On dit que f couvre g , noté $f \succ g$, s'il existe i tel que :*

- $f = (a_1, \dots, a_{i-1}, a_i, \quad a_{i+1}, \dots, a_n)$
- $g = (a_1, \dots, a_{i-1}, a_i - 1, a_{i+1}, \dots, a_n)$

Cette relation de couverture engendre notre poset pour \mathcal{PF}'_n .

Théorème 5 (Théorème principal). *Le nombre d'intervalles dans ces posets est égal au $n+1^e$ terme de la suite de l'OEIS A005700².*

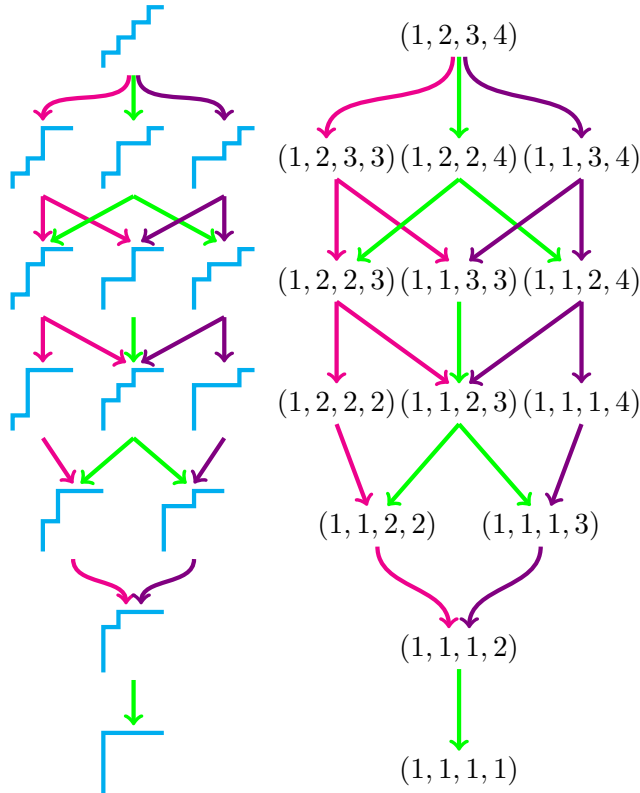
Alec Mihailovs a démontré que le n^e terme de cette séquence est égal à

$$\frac{6(2n)!(2n+2)!}{n!(n+1)!(n+2)!(n+3)!}$$

Les premiers termes de cette suite sont 1, 1, 3, 14, 84, 594, 4719, 40898, 379236, 3711916, ...

Démonstration. Puisque le nombre d'intervalles dans le poset de \mathcal{D}_n peut être vu comme le nombre de paires (w_1, w_k) telles que $w_1 \succ_d w_2 \succ_d \dots \succ_d w_k$, alors nous pouvons décrire le nombre d'intervalles comme étant le nombre de *paires de chemins de Dyck imbriqués*. Ce nombre est bien égal à la suite A005700 (Bruce Westbury, 2013). \square

Exemple (Les posets de \mathcal{D}_4 et \mathcal{PF}'_4).



Ces posets contiennent chacun $\frac{1}{5} \binom{8}{4} = 14$ éléments et 84 relations.

2. <https://oeis.org/A005700>

On souhaite maintenant étendre cette construction au cas non-primitif. Bien que celle sur les fonctions de parking soit la même, il reste à expliciter la bijection, et à définir la relation de couverture sur les mots de Dyck *décorés*.

2.2 Le cas général

Les exemples 13 à 16 donnés en annexe B illustrent les propositions, définitions et théorèmes de cette section.

Proposition 3. *Puisque \mathcal{PF}_n et \mathcal{LD}_n ont le même cardinal, nous pouvons créer une bijection entre les fonctions de parking classiques de longueur n et les mots de Dyck décorés de longueur $2n$.*

Démonstration.

- $\mathcal{PF}_n \rightarrow \mathcal{LD}_n$: Soit $f = (a_1, \dots, a_n) \in \mathcal{PF}_n$ une fonction de parking. Pour tout $i \in \{1, \dots, n\}$, posons $im_i : \{j \mid a_j = i\}$.
Notons alors $im_{i,1}, \dots, im_{i,k_i}$ les éléments de im_i triés par ordre croissant.
Le mot de Dyck décoré correspondant sera $\underbrace{im_{1,1} \cdots im_{1,k_1}}_{im_1} 0 \underbrace{im_{2,1} \cdots im_{2,k_2}}_{im_2} 0 \cdots \underbrace{im_{n,1} \cdots im_{n,k_n}}_{im_n} 0$.
- $\mathcal{LD}_n \rightarrow \mathcal{PF}_n$: Soit w un mot de Dyck décoré. Considérons sa représentation sous la forme d'un chemin de Dyck. Notons s_i l'abscisse du i^e pas Nord.
On note alors $label(i)$ le label du i^e pas nord, et $dist_i = \{label(j) \mid s_j = i\}$ l'ensemble des labels des pas Nord à distance i de l'axe des ordonnées.
Ainsi, si $j \in dist_i$, on pose $a_j = i + 1$.
La fonction de parking correspondante sera donc (a_1, \dots, a_n) .

□

La relation suivante est l'extension de \succ_d au cas décoré.

Définition 8 (\succ_{ld}). *Soient w et w' deux mots de Dyck décorés. On dit que w couvre w' , noté $w \succ_{ld} w'$, s'il existe l, r, x, x', y, z , et z' tels que :*

- l est le mot vide, ou finit par un 0
- r est le mot vide, ou commence par un 0
- $x = x_1 x_2 \cdots$ avec $x_i > 0$ pour tout i
- $z = z_1 z_2 \cdots$ avec $z_i > 0$ pour tout i
- $x' = x$ où y est correctement inséré en ordre croissant
- y apparait dans z , et $z' = z$ où y a été supprimé
- $w = lx0zr$
- $w' = lx'0z'r$

Pour expliquer l'idée derrière cette relation de couverture, nous aurons besoin de la définition suivante.

Définition 9 (Montée). *Une montée d'un mot de Dyck (décoré ou non) est une sous-mot maximal ne contenant pas de 0, et suivi d'un 0.*

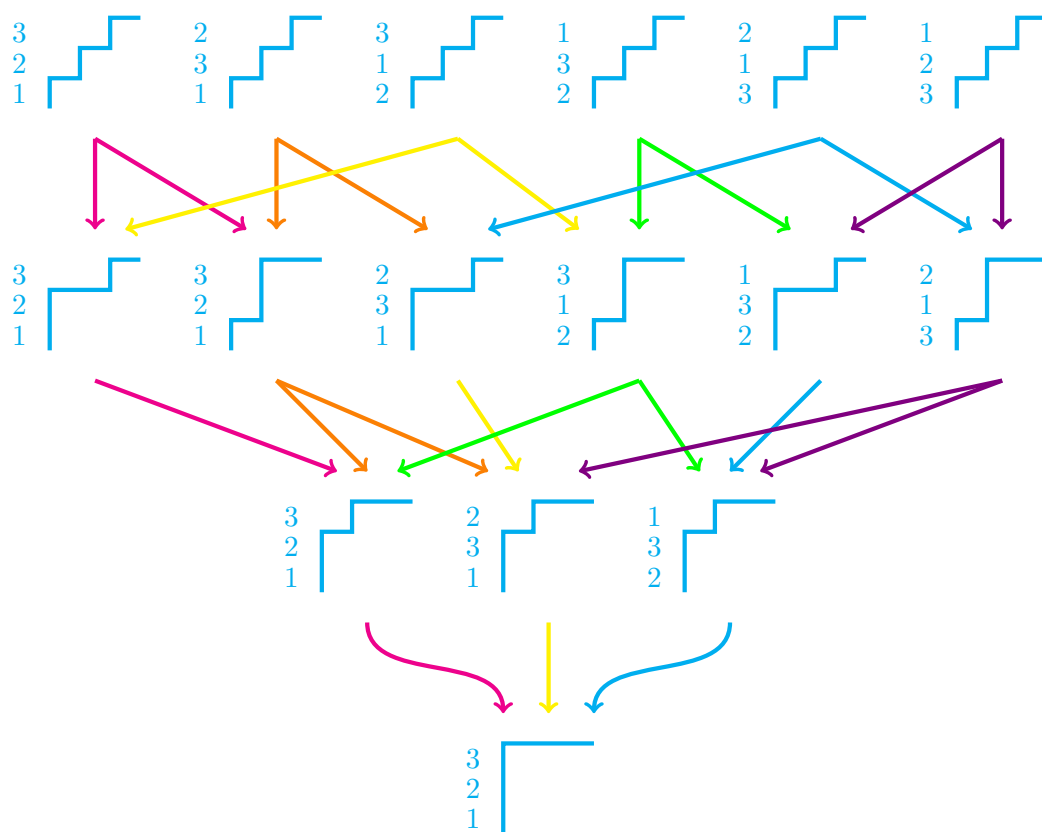
Remarque. Si $w_1 \succ_{ld} w_2$, alors le chemin de Dyck décoré correspondant à w_2 est au dessus de celui correspondant à w_1 , et la différence entre les deux est un carré de côté 1. De plus, la relation \succ_{ld} peut être vue ainsi : w_1 couvre w_2 si et seulement si l'on peut obtenir w_2 à partir de w_1 en enlevant un élément de la $i + 1^e$ montée, et en réinsérant cet élément en ordre croissant dans la i^e montée.

Cette relation de couverture engendre notre poset pour \mathcal{LD}_n . En gardant la relation \succ sur l'ensemble des fonctions de parking classiques, on obtient ainsi les posets bijectifs espérés.

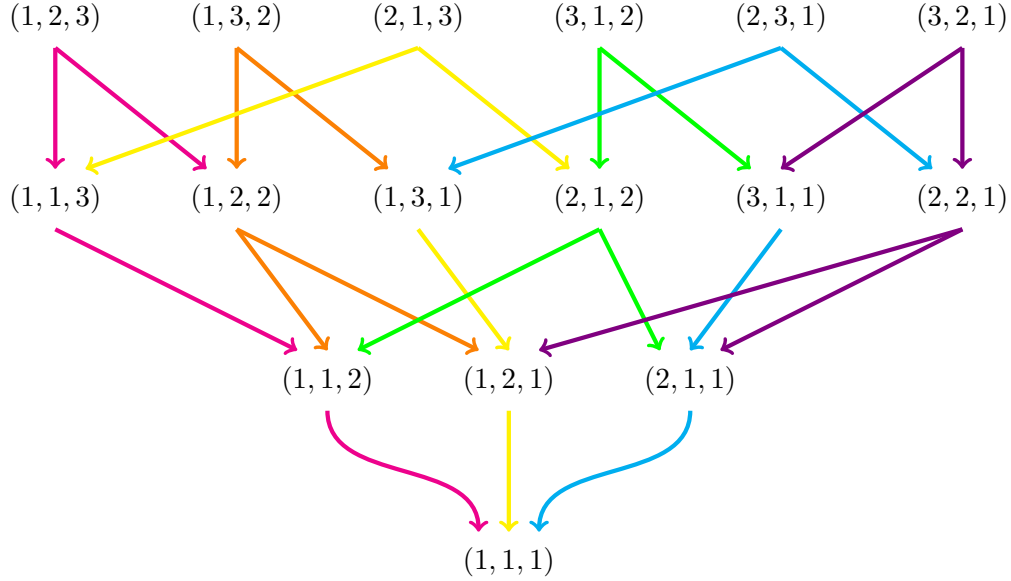
Conjecture (Conjecture Principale). Le nombre d'intervalles des posets définis ici pour \mathcal{LD}_n et \mathcal{PF}_n est le $n + 1^e$ terme de la suite de l'OEIS A196304³.

Les premiers termes de cette suite sont 1, 1, 5, 64, 1587, 65421, 4071178, 357962760, 4237910716,

Exemple (Les posets de \mathcal{LD}_3 et \mathcal{PF}_3).



3. <https://oeis.org/A196304>



Il y a $4^2 = 16$ éléments et 64 intervalles dans chacun de ces posets.

Bien que, à notre connaissance, il n'existe pas de structure combinatoire associée à cette suite, les tests effectués via Sagemath sur $n = 1, 2, \dots, 8$ suggèrent que le nombre d'intervalles de nos posets puissent en être une.

Pour aller plus loin, la prochaine partie aborde une généralisation des fonctions de parking : les fonctions de parking *rationnelles*.

Cette extension peut être vue ainsi : Soit (a_1, \dots, a_n) une séquence d'entiers positifs, et (b_1, \dots, b_n) son tri par ordre croissant. Dans le cas classique, les limites pour (b_1, \dots, b_n) étaient $(1, \dots, n)$, et dépendaient donc d'un unique entier n . Dans le cas rationnel, les limites dépendront de *deux entiers premiers entre eux* a et b . Plus précisément, ces limites seront $(1, 1 + \frac{b}{a}, 1 + \frac{2b}{a}, 1 + \frac{3b}{a}, \dots)$, avec $a = n$.

3 Un poset pour les fonctions de parking rationnelles

3.1 Fonctions de parking rationnelles

Cette partie est illustrée par les exemples 17 à 19 de l'annexe C.

Définition 10 (a, b - Fonction de Parking). *Une a, b - fonction de parking est une séquence d'entiers positifs (a_1, a_2, \dots, a_n) telle que :*

- $n = a$
- son tri croissant (b_1, b_2, \dots, b_n) respecte la condition suivante : $b_i \leq \frac{b}{a}(i-1) + 1$ pour tout $i \leq n$.

On note $\mathcal{PF}_{a,b}$ l'ensemble des a, b - fonctions de parking.

Théorème 6 (Armstrong, Loehr et Warrington, 2014). *Soit $pf_{a,b}$ le cardinal de $\mathcal{PF}_{a,b}$. Nous avons*

$$pf_{a,b} = b^{a-1}$$

Remarque. *Le cas classique peut être vu comme le cas $a = n, b = n + 1$. Autrement dit, $\mathcal{PF}_{n,n+1} = \mathcal{PF}_n$.*

Similairement au cas classique, on définit une fonction de parking *rationnelle primitive* comme une fonction de parking primitive triée en ordre croissant. On note $\mathcal{PF}'_{a,b}$ l'ensemble des a, b - fonctions de parking primitives.

Théorème 7. *Soit $pf'_{a,b}$ le cardinal de $\mathcal{PF}'_{a,b}$. Nous avons*

$$pf'_{a,b} = \frac{1}{a+b} \binom{a+b}{b}$$

Ce nombre est appelé le *nombre de Catalan rationnel*, et on le note $Cat(a,b)$. Là aussi, le cas classique correspond à $a = n, b = n + 1$. Autrement dit, $\mathcal{PF}'_{n,n+1} = \mathcal{PF}'_n$.

3.2 Chemins de Dyck rationnels

Cette partie est illustrée par les exemples 20 à 25 de l'annexe C.

Définition 11 (a, b - mot de Dyck). *Un a, b - mot de Dyck est un mot $w \in \{0, 1\}^*$ tel que :*

- pour tout suffixe w' de w , $|w'|_1 \geq \frac{a}{b}|w'|_0$.
- $|w|_0 = b$.
- $|w|_1 = a$.

Un a, b - mot de Dyck peut être représenté par un chemin allant du point $(0,0)$ au point (b,a) , et restant au dessus de l'axe $y = \frac{a}{b}x$, appelé *a, b - chemin de Dyck* :

- Chaque 1 correspond à un *pas Nord* \uparrow .
- Chaque 0 correspond à un *pas Est* \rightarrow .

On note $\mathcal{R}_{a,b}$ l'ensemble des a, b - mots de Dyck.

Théorème 8 (Bizley, 1954). *Soit $r_{a,b}$ le cardinal de $\mathcal{R}_{a,b}$. Nous avons*

$$r_{a,b} = \frac{1}{a+b} \binom{a+b}{a} = \frac{(a+b-1)!}{a!b!}$$

On remarque ainsi que l'on pourra bien créer une bijection entre $\mathcal{PF}'_{a,b}$ et $\mathcal{R}_{a,b}$. Cette bijection sera exactement la même que celle entre \mathcal{PF}'_n et \mathcal{D}_n .

Il reste maintenant à définir les chemins de Dyck qui seront en bijection avec $\mathcal{PF}_{a,b}$.

Définition 12 (a, b - mot de Dyck décoré). *Un a, b - chemin de Dyck décoré est un mot $w \in \{0, \dots, n\}^*$ tel que :*

- *pour tout suffixe w' de w , $|w'|_{\neq 0} \geq \frac{a}{b}|w'|_0$.*
- *$|w|_0 = b$.*
- *$|w|_{\neq 0} = a$.*
- *pour tout $i \in \{1, \dots, a\}$, w a exactement une occurrence de i .*
- *si $w_i \neq 0$ et $w_{i+1} \neq 0$, alors $w_i < w_{i+1}$. Autrement dit, les labels des pas Nord consécutifs sont croissants.*

Un a, b - mot de Dyck décoré peut être représenté par un chemin allant du point $(0,0)$ au point (b,a) , où chaque pas Nord a un label :

- Chaque $i \neq 0$ correspond à un *pas Nord* \uparrow dont le label est i .
- Chaque 0 correspond à un *pas Est* \rightarrow .

Ces chemins sont appelés *a, b - chemins de Dyck décorés*.

On note $\mathcal{LR}_{a,b}$ l'ensemble des a, b - chemins de Dyck.

Théorème 9. *Soit $lr_{a,b}$ le cardinal de $\mathcal{LR}_{a,b}$. Nous avons*

$$lr_{a,b} = b^{a-1}$$

On retrouve bien le même cardinal que pour $\mathcal{PF}_{a,b}$. A nouveau, la bijection entre $\mathcal{PF}_{a,b}$ et $\mathcal{LR}_{a,b}$ sera exactement la même que celle entre \mathcal{PF}_n et \mathcal{LD}_n .

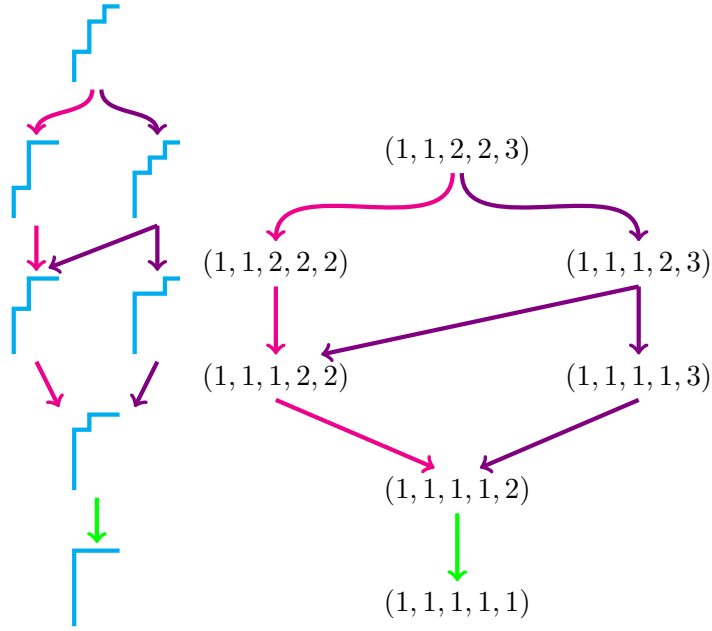
Les relations de couverture restent inchangées :

- Pour $\mathcal{PF}'_{a,b}$ et $\mathcal{PF}_{a,b}$: \succ
- Pour $\mathcal{R}_{a,b}$: $\succ_r = \succ_d$
- Pour $\mathcal{LR}_{a,b}$: $\succ_{lr} = \succ_{ld}$

On peut maintenant construire nos posets pour le cas rationnel.

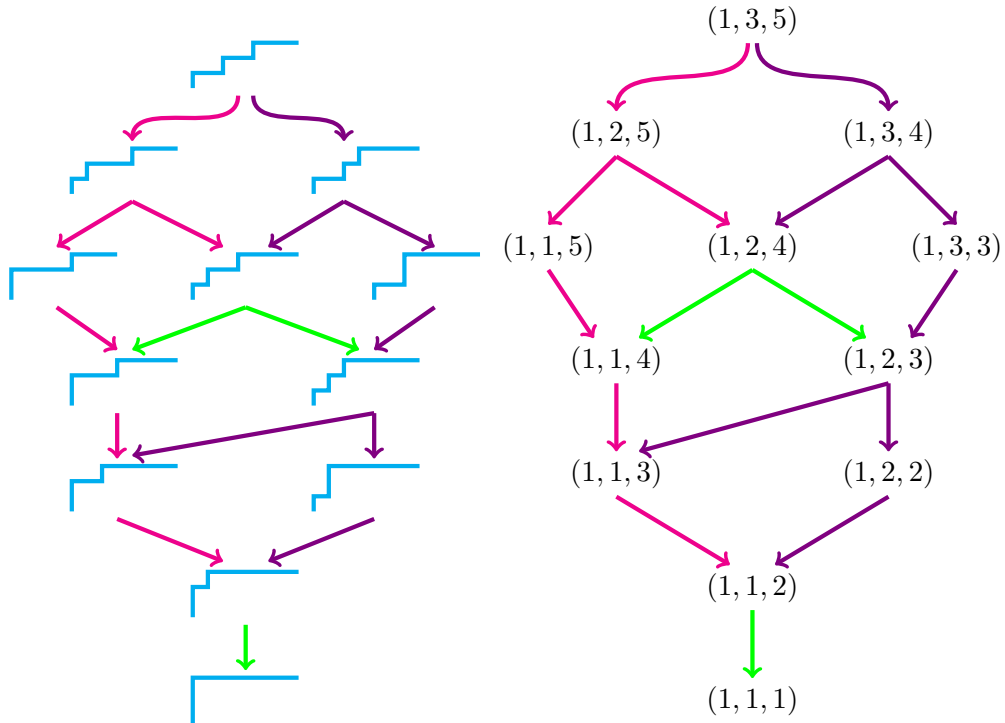
3.3 Posets rationnels

Exemple ($a > b$: Les posets de $\mathcal{R}_{5,3}$ et $\mathcal{PF}'_{5,3}$).



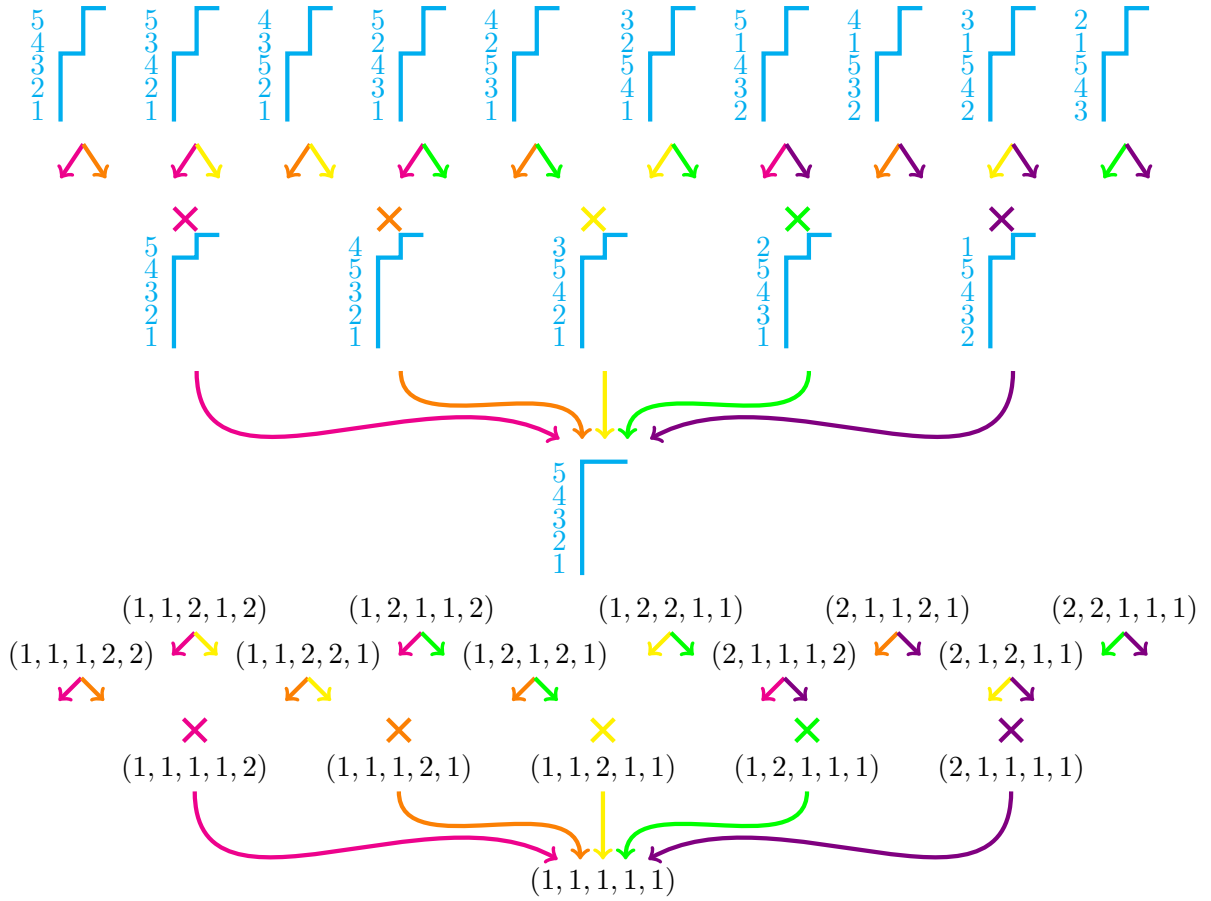
Chacun de ces posets comporte $\frac{1}{8} \binom{8}{5} = 7$ éléments.

Exemple ($a < b$: Les posets de $\mathcal{R}_{3,7}$ et $\mathcal{PF}'_{3,7}$).



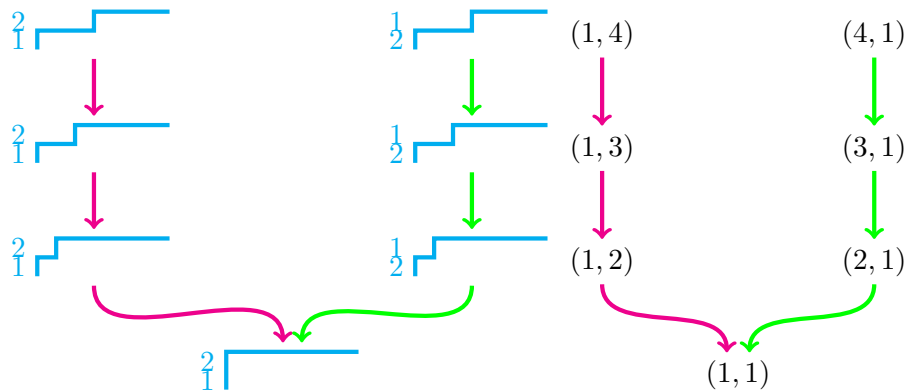
Chacun de ces posets comporte $\frac{1}{10} \binom{10}{3} = 12$ éléments.

Exemple ($a > b$: Les posets de $\mathcal{LR}_{5,2}$ et $\mathcal{PF}_{5,2}$).



Pour plus de clarté, les flèches ont été simplifiées. Celles des deux plus hauts niveaux sont à comprendre ainsi : chaque flèche finit là où il y a une croix de la même couleur. Il y a $2^4 = 16$ éléments dans chacun de ces posets.

Exemple ($a < b$: Les posets de $\mathcal{LR}_{2,7}$ et $\mathcal{PF}_{2,7}$).



Il y a $7^1 = 7$ éléments dans chacun de ces posets.

4 Arbres de parking rationnels

Nous commençons par rappeler ce qu'est un arbre de parking.

Définition 13 (Arbre de Parking). *Un arbre de parking est défini à partir d'une fonction de parking $f = (a_1, \dots, a_n) \in \mathcal{PF}_n$ ainsi :*

- *Pour tout $1 \leq i \leq n+1$, on définit s_i comme $\{j \mid a_j = i\}$*
- *$[s_1, \dots, s_{n+1}]$ décrit le parcours préfixe de l'arbre.*
- *Chaque noeud étiqueté par un ensemble de taille k est d'arité k .*

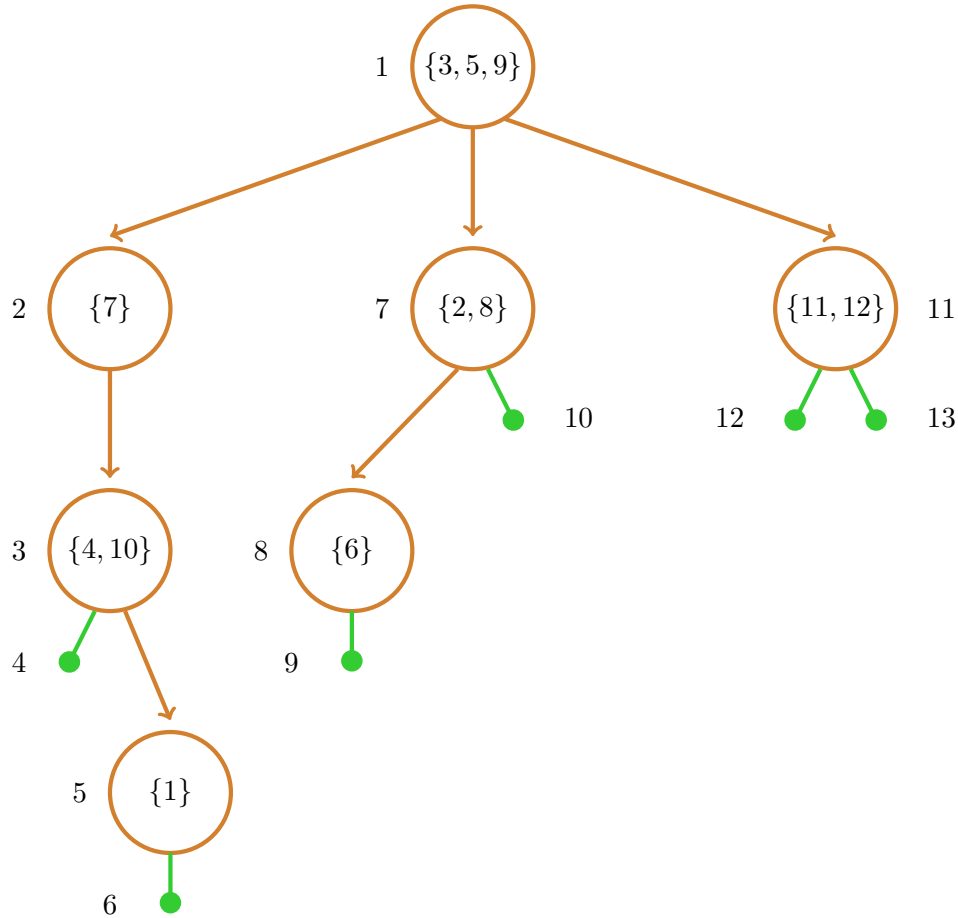
Remarque. *Les feuilles de l'arbre correspondent aux éléments i tels que $1 \leq i \leq n+1$, où i n'est pas dans f .*

De plus, comme l'arbre possèdera – par définition – n branches, la présence d'un noeud correspondant à $n+1$ est nécessaire, bien que son étiquette sera toujours l'ensemble vide.

Exemple ($n = 12$).

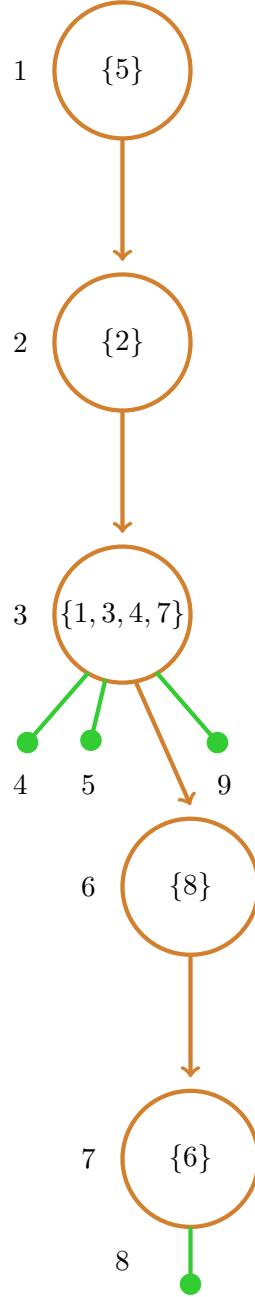
— $f = (5, 7, 1, 3, 1, 8, 2, 7, 1, 3, 11, 11)$

— *Labels* : $[\{3, 5, 9\}, \{7\}, \{4, 10\}, \emptyset, \{1\}, \emptyset, \{2, 8\}, \{6\}, \emptyset, \emptyset, \{11, 12\}, \emptyset, \emptyset]$



Inversement, en lisant les étiquettes d'un arbre de parking en ordre préfixe, on obtient la liste des positions de chaque nombre dans la fonction de parking correspondante, ce qui crée ainsi une *bijection*.

Exemple (De l'arbre à la fonction).



- Les étiquettes sont $[\{5\}, \{2\}, \{1, 3, 4, 7\}, \emptyset, \emptyset, \{8\}, \{6\}, \emptyset, \emptyset]$.
- La fonction correspondante est donc $(3, 2, 3, 3, 1, 7, 3, 6) \in \mathcal{PF}_8$.

On cherche maintenant à étendre cette construction au cas rationnel.

Définition 14 (Arbre de Parking Rationnel). *Un arbre de parking rationnel est défini à partir d'une fonction de parking rationnelle $f = (a_1, \dots, a_a) \in \mathcal{PF}_{a,b}$ ainsi :*

- Pour tout $1 \leq i \leq n+1$, on définit la limite l_i comme étant la partie entière de $\frac{b}{a}(i-1)+1$.

Posons $l_0 = 0$.

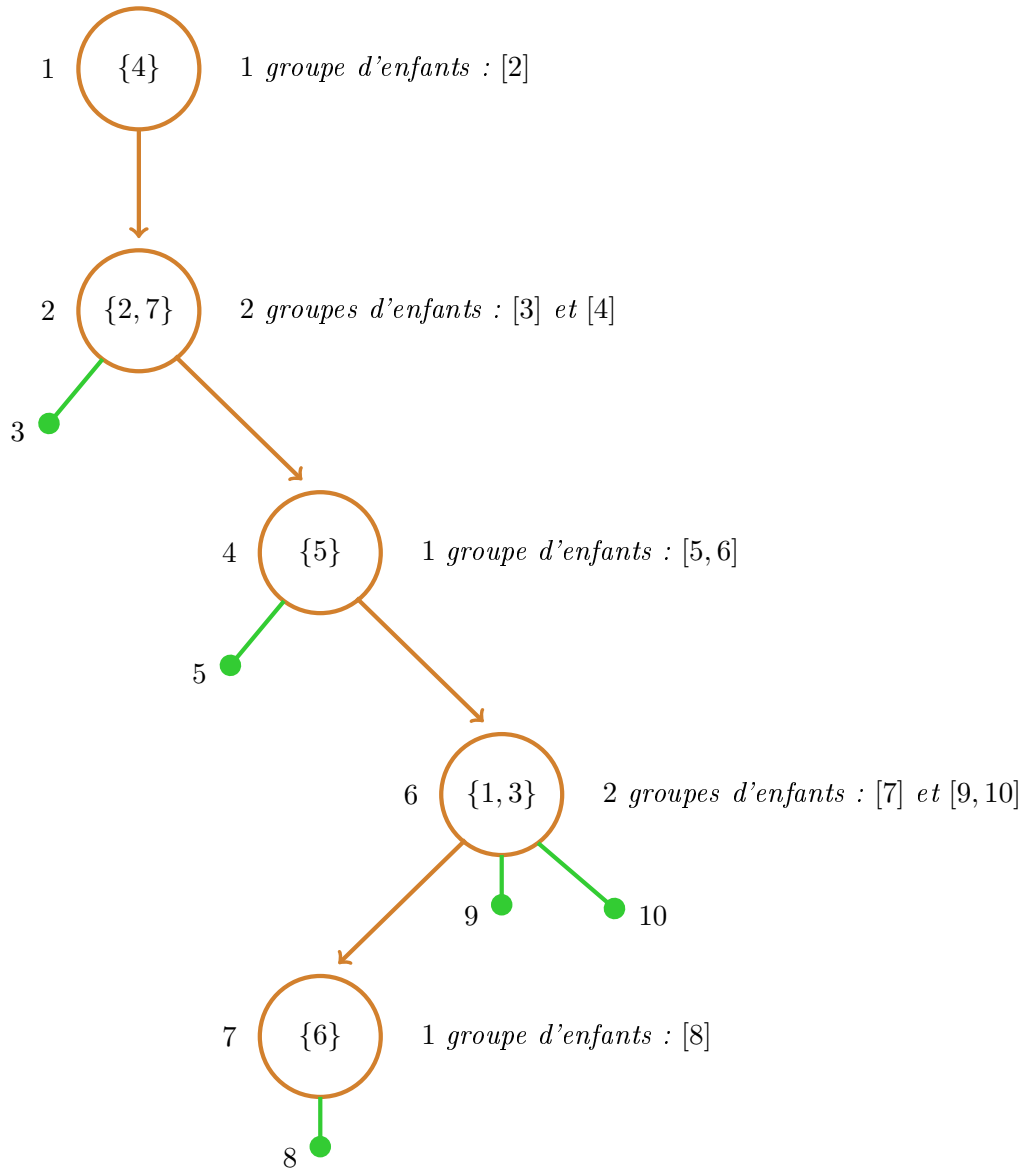
- De ces limites, nous déduisons les intervalles $itv_i =]l_{i-1}, l_i]$ for $1 \leq i \leq a + 1$.
- Pour tout $1 \leq i \leq b + 1$, posons $s_i = \{j \mid a_j = i\}$.
- $[s_1, \dots, s_{b+1}]$ décrit alors le parcours préfixe de notre arbre.
- Chaque noeud étiquetté par un ensemble de taille k possède k groupes d'enfants, qui sont définis par les intervalles.

Exemple ($a < b$).

- $a = 7$
- $b = 9$
- Limites : $[1, 2\frac{2}{7}, 3\frac{4}{7}, 4\frac{6}{7}, 6\frac{1}{7}, 7\frac{3}{7}, 8\frac{5}{7}, 10]$
- Limites entières : $[0, 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10]$
- Intervalles :

$$]0, 1] \quad]1, 2] \quad]2, 3] \quad]3, 4] \quad]4, 6] \quad]6, 7] \quad]7, 8] \quad]8, 10]$$
- Groupes d'enfants :

$$[1] \quad [2] \quad [3] \quad [4] \quad [5, 6] \quad [7] \quad [8]$$
- $f = (6, 2, 6, 1, 4, 7, 2)$
- Etiquettes : $\{\{4\}, \{2, 7\}, \emptyset, \{5\}, \emptyset, \{1, 3\}, \{6\}, \emptyset, \emptyset, \emptyset\}$



Exemple ($a > b$).

— $a = 9$

— $b = 7$

— *Limites* : $[1, 1\frac{7}{9}, 2\frac{5}{9}, 3\frac{3}{9}, 4\frac{1}{9}, 4\frac{8}{9}, 5\frac{6}{9}, 6\frac{4}{9}, 7\frac{2}{9}, 8]$

— *Limites entières* : $[0, 1, 1, 2, 3, 4, 4, 5, 6, 7, 8]$

— *Intervalles* :

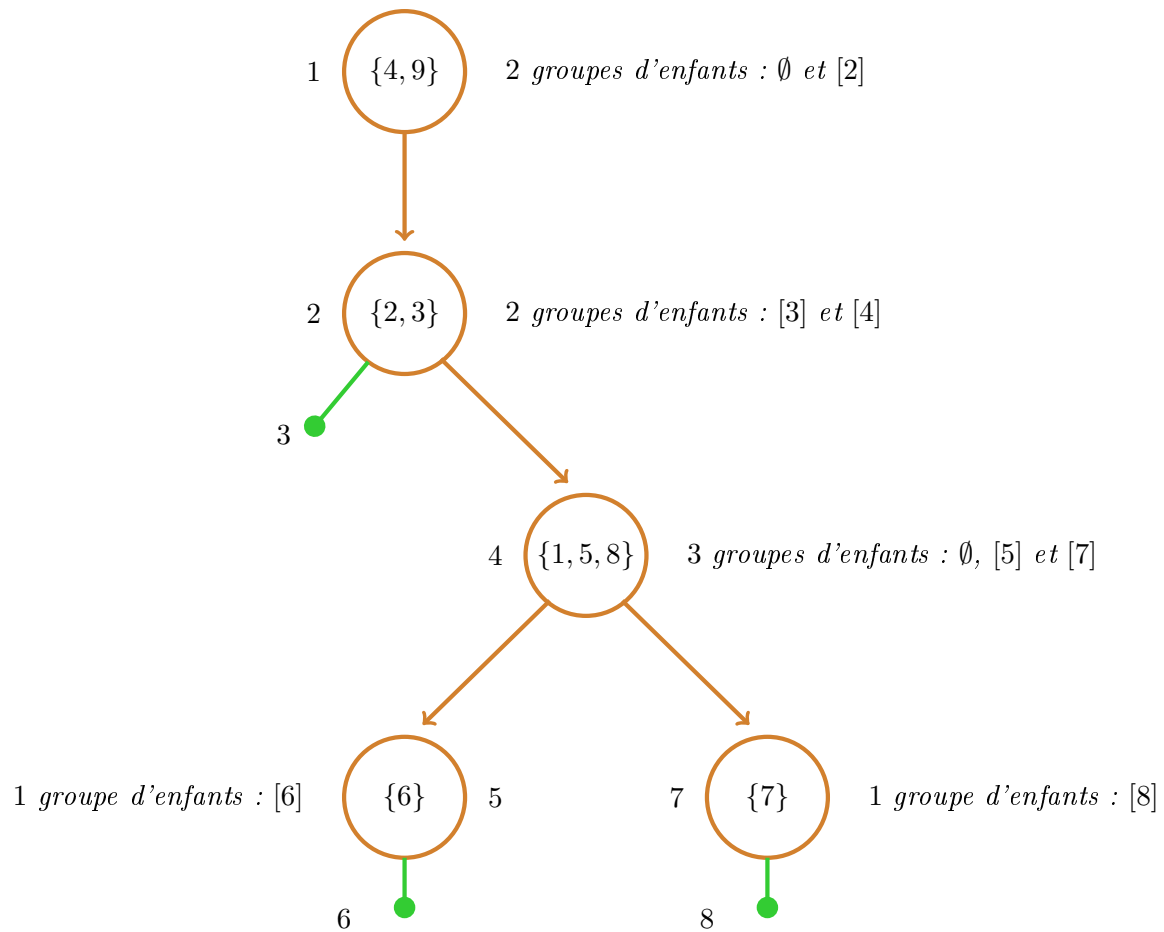
$]0, 1]$	$]1, 1]$	$]1, 2]$	$]2, 3]$	$]3, 4]$
$]4, 4]$	$[4, 5]$	$]5, 6]$	$]6, 7]$	$]7, 8]$

— *Groupes d'enfants* :

$[1]$	\emptyset	$[2]$	$[3]$	$[4]$	\emptyset	$[5]$	$[6]$	$[7]$	$[8]$
-------	-------------	-------	-------	-------	-------------	-------	-------	-------	-------

— $f = (4, 2, 2, 1, 4, 5, 7, 4, 1)$

— *Etiquettes* : $\{\{4, 9\}, \{2, 3\}, \emptyset, \{1, 5, 8\}, \{6\}, \emptyset, \{7\}, \emptyset\}$



Dans les deux cas, la direction inverse de la *bijection* est obtenue – comme pour le cas classique – par un parcours préfixe.

5 Conclusion

Références

- [1] Alan G. Konheim and Benjamin Weiss. An occupancy discipline and applications. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 14(6) :1266–1274, 1966.
- [2] R.P. Stanley and G.C. Rota. *Enumerative Combinatorics : Volume 1*. Cambridge Studies in Advanced Mathematics. Cambridge University Press, 1997.
- [3] R.P. Stanley and S. Fomin. *Enumerative Combinatorics : Volume 2*. Cambridge Studies in Advanced Mathematics. Cambridge University Press, 1997.
- [4] Germain Kreweras. Sur les partitions non croisees d’un cycle. *Discret. Math.*, 1 :333–350, 1972.
- [5] Paul H. Edelman. Chain enumeration and non-crossing partitions. *Discret. Math.*, 31 :171–180, 1980.
- [6] Drew Armstrong, Nicholas A. Loehr, and Gregory S. Warrington. Rational parking functions and catalan numbers. *Annals of Combinatorics*, 20 :21–58, 2014.
- [7] Michelle Bodnar. Rational noncrossing partitions for all coprime pairs, 2017.
- [8] Bérénice Delcroix-Oger, Matthier Josuat-Vergès, and Lucas Randazzo. Some properties of the parking function poset. 2020.

A Exemples pour l'Introduction

Exemple 1 (Définition 1 : $n = 7$).

- $f_1 = (7, 3, 1, 4, 2, 5, 2) \in \mathcal{PF}_7$
- $f_2 = (7, 3, 1, 4, 2, 5, 4) \notin \mathcal{PF}_7$

Exemple 2 (Théorème 1 : $n = 3 : pf_3 = 16$).

- $(1, 1, 1) \rightarrow (1, 1, 2) \rightarrow (1, 1, 3) \rightarrow (1, 2, 1) \rightarrow (1, 2, 2) \rightarrow (1, 2, 3) \rightarrow (1, 3, 1) \rightarrow (1, 3, 2)$
- $(2, 1, 1) \rightarrow (2, 1, 2) \rightarrow (2, 1, 3) \rightarrow (2, 2, 1) \rightarrow (2, 3, 1) \rightarrow (3, 1, 1) \rightarrow (3, 1, 2) \rightarrow (3, 2, 1)$

Exemple 3 (Définition 2 : $n = 4$).

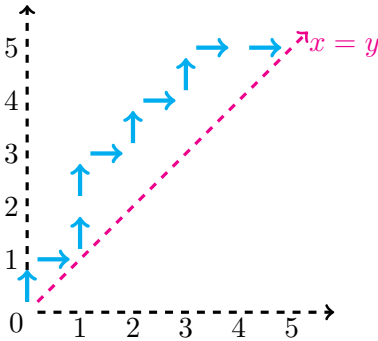
- $f_1 = (1, 2, 2, 3) \in \mathcal{PF}'_4$
- $f_2 = (1, 2, 3, 2) \notin \mathcal{PF}'_4$, bien que $f_2 \in \mathcal{PF}_4$

Exemple 4 (Théorème 2 : $n = 3 : pf'_3 = 5$).

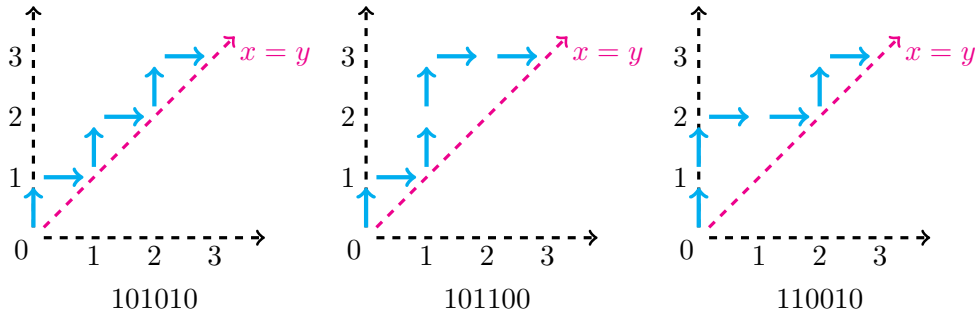
- $(1, 1, 1) \rightarrow (1, 1, 2) \rightarrow (1, 1, 3) \rightarrow (1, 2, 2) \rightarrow (1, 2, 3)$

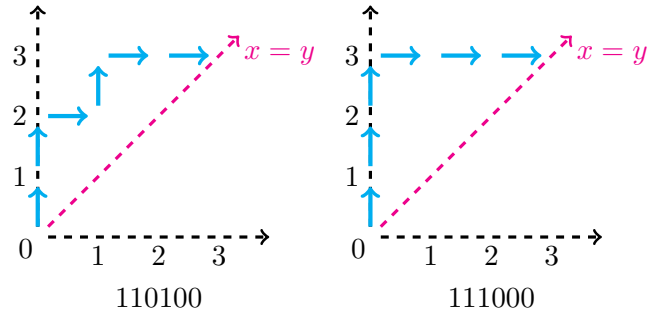
Exemple 5 (Définition 3 : $n = 5$).

- $w_1 = 1011000110$ n'est pas un mot de Dyck, car $|1011000|_0 > |1011000|_1$.
- $w_2 = 1011010101$ n'est pas un mot de Dyck, car $|w_2|_0 \neq |w_2|_1$.
- $w_3 = 1011010100$ est un mot de Dyck :



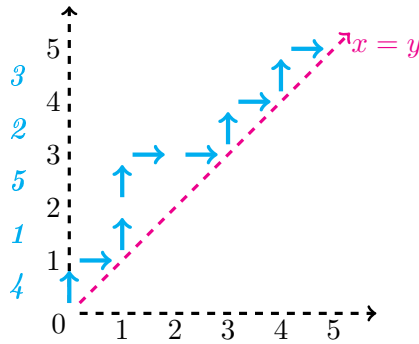
Exemple 6 (Théorème 3 : $n = 3$). $d_3 = 5$.





Exemple 7 (Définition 4 : $n = 5$).

- $w_1 = 4051002030$ n'est pas un mot de Dyck décoré, car $5 > 1$.
- $w_2 = 4015002030$ est un mot de Dyck décoré :



Exemple 8 (Théorème 4 : $n = 3$). $ld_3 = 4^2 = 16$

- Mots de la forme $XXX000$:

123000

- Mots de la forme $XX0X00$:

120300

130200

230100

- Mots de la forme $XX00X0$:

120030

130020

230010

- Mots de la forme $X0XX00$:

102300

201300

301200

- Mots de la forme $X0X0X0$:

102030

103020

201030

203010

301020

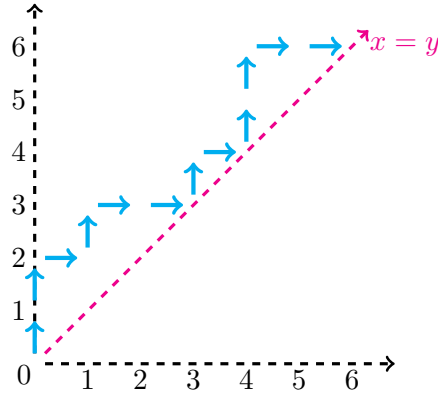
302010

B Exemples pour la Partie 2

Exemple 9 (Proposition 1 : $n = 6, \mathcal{PF}'_n \rightarrow \mathcal{D}_n$).

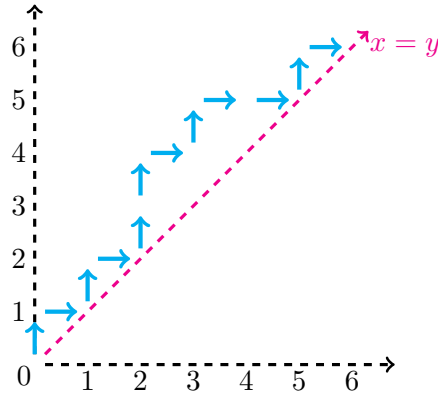
- $f = (1, 1, 2, 4, 5, 5)$

$l_1 = 2$	$l_2 = 1$	$l_3 = 0$
$l_4 = 1$	$l_5 = 2$	$l_6 = 0$
- $w = (110100101100)$



Exemple 10 (Proposition 1 : $n = 6, \mathcal{D}_n \rightarrow \mathcal{PF}'_n$).

- $w = 101011010010$



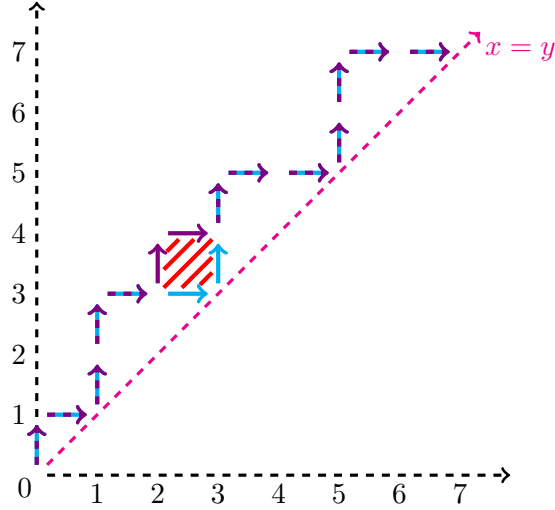
- Distances :

$s_1 = 0$	$a_1 = 1$
$s_2 = 1$	$a_2 = 2$
$s_3 = 2$	$a_3 = 3$
$s_4 = 2$	$a_4 = 3$
$s_5 = 3$	$a_5 = 4$
$s_6 = 5$	$a_6 = 6$

- $f = (1, 2, 3, 3, 4, 6)$

Exemple 11 (Définition 5 : $n = 7$). $10110011001100 \succ_d 10110101001100$

- $w_1 = 10110$
- $w_2 = 1001100$

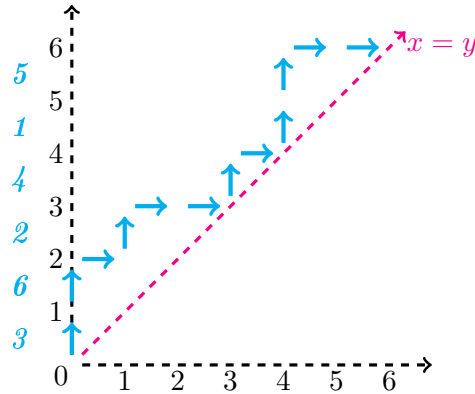


■ 10110011001100 ■ 10110101001100 ■ *différence*

Exemple 12 (Définition 7 : $n = 6$). $(1, 1, 2, 3, 4, 5) \succ (1, 1, 2, 3, 3, 5)$

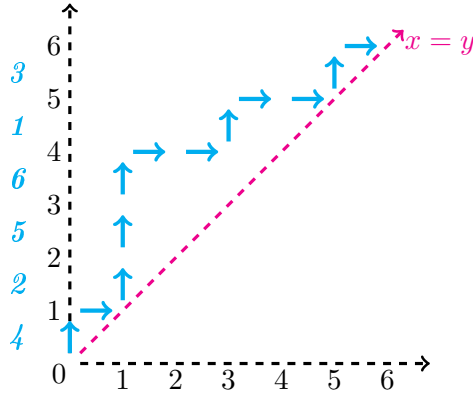
Exemple 13 (Proposition 3 : $n = 6, \mathcal{PF}_n \rightarrow \mathcal{LD}_n$).

- $f = (5, 2, 1, 4, 5, 1)$
- $im_1 = \{3, 6\}$ $im_2 = \{2\}$ $im_3 = \emptyset$
 $im_4 = \{4\}$ $im_5 = \{1, 5\}$ $im_6 = \emptyset$
- $w = 360200401500$



Exemple 14 (Proposition 3 : $n = 6, \mathcal{LD}_n \rightarrow \mathcal{PF}_n$).

- $w = 402560010030$



— Distances :

$$s_1 = 0$$

$$s_2 = 1$$

$$s_3 = 1$$

$$s_4 = 1$$

$$s_5 = 3$$

$$s_6 = 5$$

— Labels :

$$dist_0 = \{4\}$$

$$dist_1 = \{2, 5, 6\}$$

$$dist_2 = \emptyset$$

$$dist_3 = \{1\}$$

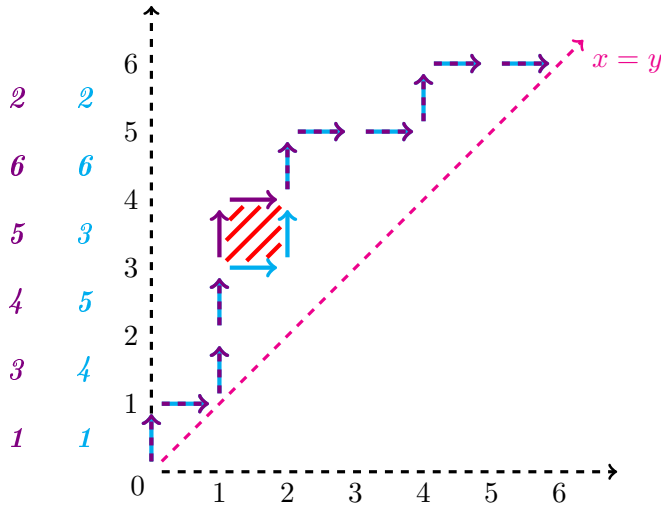
$$dist_4 = \emptyset$$

$$dist_5 = \{3\}$$

— $f = (4, 2, 6, 1, 2, 2)$

Exemple 15 (Définition 8 : $n = 5$). $104503600200 \succ_{ld} 10345060200$

— $l = 10$ — $r = 0200$ — $x = 45$ — $x' = 345$ — $y = 3$ — $z = 36$ — $z' = 6$



104503600200

10345060200

différence

Exemple 16 (Définition 9 : $n = 5$). Dans l'ordre, les montées de 104503600200 sont :

— 1 — 45 — 36 — \emptyset — 2 — \emptyset

C Exemples pour la Partie 3

Exemple 17 (Définition 10 : $a > b : a = 7, b = 3$).

- Limites pour toute séquence de $\mathcal{PF}_{7,3}$ une fois triée : $[1, 1\frac{3}{7}, 1\frac{6}{7}, 2\frac{2}{7}, 2\frac{5}{7}, 3\frac{1}{7}, 3\frac{4}{7}]$
- $f_1 = (2, 1, 1, 3, 2, 3, 1) \in \mathcal{PF}_{7,3}$
- $f_2 = (2, 1, 2, 3, 2, 3, 1) \notin \mathcal{PF}_{7,3}$, bien que $f_2 \in \mathcal{PF}_7$

Exemple 18 (Définition 10 : $a < b : a = 5, b = 7$).

- Limites pour toute séquence de $\mathcal{PF}_{5,7}$ une fois triée : $[1, 2\frac{2}{5}, 3\frac{4}{5}, 5\frac{1}{5}, 6\frac{3}{5}]$
- $f_3 = (6, 3, 5, 1, 2) \in \mathcal{PF}_{5,7}$, bien que $f_3 \notin \mathcal{PF}_5$
- $f_4 = (6, 3, 5, 1, 3) \notin \mathcal{PF}_{5,7}$

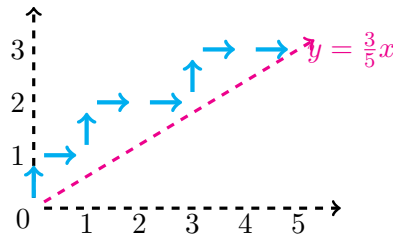
Exemple 19 (Théorème 6 : $a = 3, b = 5$).

- $pf_{a,b} = 25$ — Limites : $[1, 2\frac{2}{3}, 4\frac{1}{3}]$

(1, 1, 1)	(1, 1, 2)	(1, 1, 3)	(1, 1, 4)	(1, 2, 1)	(1, 2, 2)	(1, 2, 3)	(1, 2, 4)
(1, 3, 1)	(1, 3, 2)	(1, 4, 1)	(1, 4, 2)	(2, 1, 1)	(2, 1, 2)	(2, 1, 3)	(2, 1, 4)
(2, 2, 1)	(2, 3, 1)	(2, 4, 1)	(3, 1, 1)	(3, 1, 2)	(3, 2, 1)	(4, 1, 1)	(4, 1, 2)
(4, 2, 1)							

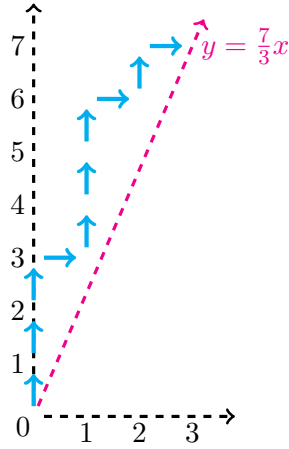
Exemple 20 (Définition 11 : $a < b : a = 3, b = 5$).

- $w_1 = 10100010$ n'est pas un 3, 5 - mot de Dyck, car $|101000|_1 = 2 < \frac{3}{5}|101000|_0 = 2\frac{2}{5}$.
- $w_2 = 10100100$ est un 3, 5 - mot de Dyck :

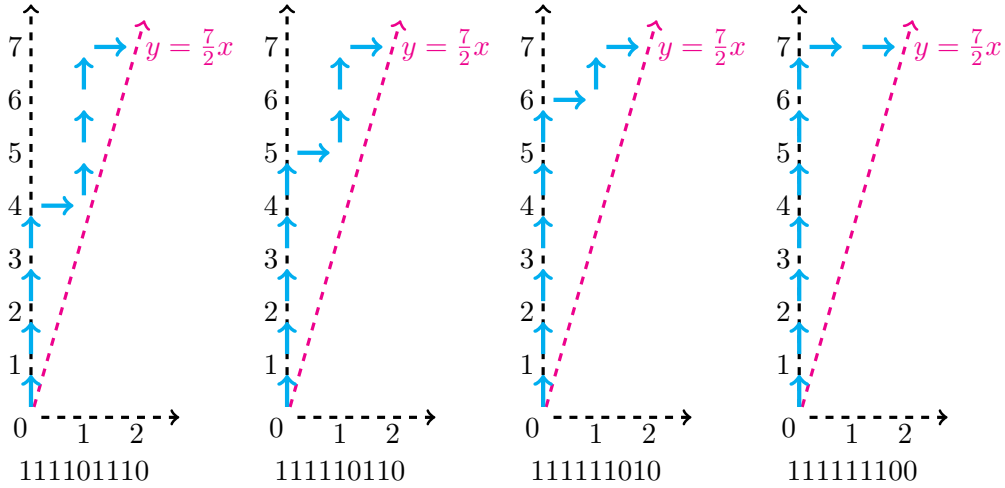


Exemple 21 (Définition 11 : $a > b : a = 7, b = 3$).

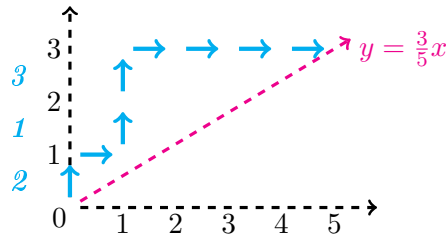
- $w_1 = 1110011110$ n'est pas un 7, 3 - mot de Dyck, car $|11100|_1 = 3 < \frac{7}{3}|11100|_0 = 4\frac{1}{3}$.
- $w_2 = 1110111010$ est un 7, 3 - mot de Dyck :



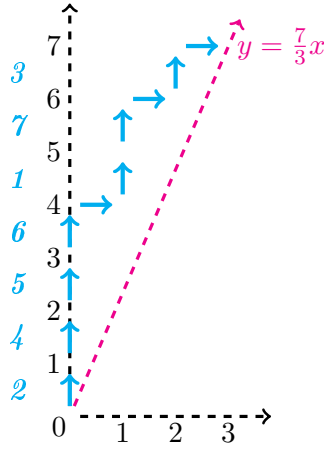
Exemple 22 (Théorème 8 : $a = 7, b = 2$). $r_n = 4$.



Exemple 23 (Définition 12 : $a < b : a = 3, b = 5$). $w = 20130000$:



Exemple 24 (Définition 12 : $a > b : a = 7, b = 3$). $w_2 = 2456017030$:



Exemple 25 (Théorème 9 : $a = 4, b = 3$). $lr_{a,b} = 3^3 = 27$

— Mots de la forme $XXXX000$:

1234000

— Mots de la forme $XXX0X00$:

1230400

1240300

1340200

2340100

— Mots de la forme $XX0XX00$:

1203400

1302400

1402300

2301400

2401300

3401200

— Mots de la forme $XXX00X0$:

1230040

1240030

1340020

2340010

— Mots de la forme $XX0X0X0$:

1203040

1204030

1302040

1304020

1402030

1403020

2301040

2304010

2401030

2403010

3401020

3402010