

# THÈSE DE DOCTORAT

présentée par

**Esteban Isasi Catalá**

pour obtenir le grade de docteur de l'Université de la Méditerranée, spécialité

physique théorique, physique mathématique et physique des particules.

**Méthode de scission modulaire et symétries quantiques des graphes non-simplement lacés en théorie de champs conforme.**

Soutenance prévue le 18 Octobre 2006 devant le jury composé de :

R. Coquereaux	DR au Centre de Physique Théorique	Directeur de thèse.
S. Khoroshkin,	Prof. de l'Institute of Theoretical and Experimental Physics	Membre du jury.
O. Ogievetsky	Prof. à l'Université de la Méditerranée	Président du jury.
E. H. Tahri	Prof. à l'Université Mohammed I	Rapporteur et membre du jury
R. Trincherò	Prof. au Centro Atómico de Bariloche	Rapporteur



# Remerciements

Je voudrais, comme il se doit, remercier ici certaines personnes sans qui ce travail n'aurait pu voir le jour.

Robert Coquereaux, d'abord pour m'avoir accepté comme son étudiant de DEA, pour m'avoir fait confiance, et par la suite pour m'avoir dirigé dans cette thèse. Il a su orienter mes recherches aux bons moments en me faisant découvrir la physique mathématique, ses conseils, sa collaboration et son esprit amical furent précieux et indispensables pour en arriver là, et pour construire un lien qui, j'en suis sûr continuera dans le futur.

Roberto Trincherro, Oleg Ogievetsky ont particulièrement nourrit mes réflexions grâce aux discussions et échanges scientifiques, Hassan Tahri pour m'avoir invité à travailler avec lui au Maroc. Je souhaite exprimer toute ma gratitude envers les membres du jury qui ont bien voulu consacrer à ma thèse une partie de leur temps.

Gil Schieber précieux collaborateur, ami et guide pour toutes les journées et nuits que nous avons passés à travailler ensemble.

Je mentionne avec plaisir mes chers amis et compagnons inséparables du DEA et de thèse Arnaud, Winston, Julien, Mauricio, l'apport intellectuel et culturel, produit d'innombrables et fructueuses discussions de tous les jours, du repas de midi et demi, les inoubliables voyages que nous avons fait ensemble, le soutien moral qu'ils m'ont offert tout à long de ces quatre années. Particulièrement je remercie Arnaud pour sa contribution directe et essentielle, au bon achèvement de la rédaction de la thèse.

L'ensemble de l'équipe administratif du CPT, la bonne ambiance dégagée de ses bureaux et qui arrivait jusqu'au mien m'a aidé à garder le bon humour.

Pour leurs encouragements constants et leur assistance aussi bien matérielle que morale qui m'ont permis de faire cette thèse dans de bonnes conditions, je remercie chaleureusement ma famille et ma belle famille. Ils ont su, depuis l'autre coté de l'océan atlantique, soutenir et encourager ce difficile projet qui a été venir fair mes études en France.

Romy pour m'avoir accueilli et m'avoir ouvert les portes de sa maison aussi chaleureusement sans vraiment me connaître, peu après mon arrivée sur Marseille.

Toute mon amour, ma reconnaissance et gratitude à Daniella, ma femme, ma compagne, mon confident et mon soutien ; ma gratitude pour m'avoire autant aidé dans ce projet, mais surtout ma reconnaissance pour avoir eu le courage et la confiance de m'accompagner dans ceci qui a été notre aventure fançaise. Il y a eu tant de difficultés surmontés et tant de choses merveilleuses. Merci pour être là tous les jours.



# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>ix</b>
<b>1 Symétries quantiques de graphes ADE.</b>	<b>1</b>
1.1 Notions sur les graphes et graphes ADE.	1
1.1.1 Graphes bi-orientés et leur classification	3
1.2 Produit de représentations irréductibles et graphes $\mathcal{A}$	4
1.2.1 Cas classique	4
1.2.2 Cas quantique	4
1.2.3 Algèbre de graphe et matrices $N_i$	6
1.2.4 $G$ comme module sur $\mathcal{A}(G)$ : matrices $F_i$ (ou $E_a$ )	7
1.3 La bigèbre de Hopf faible $\mathcal{B}$ associé a un graphe ADE	9
1.3.1 L'espace vectoriel des triangles admissibles.	9
1.3.2 Bigèbre faible $\mathcal{B}$	12
1.3.3 Projecteurs minimaux centraux, unités et counités	16
1.3.4 Algèbres de caractères pour $\mathcal{B}$ et $\widehat{\mathcal{B}}$	17
1.3.5 Cellules d'Ocneanu	18
1.4 Le graphe d'Ocneanu $Oc(G)$	20
1.4.1 Définition	20
1.4.2 $G$ comme module sur $Oc(G)$ : matrices $S_x$	21
1.5 Relations entre $\mathcal{A}(G)$ et $Oc(G)$	22
1.5.1 Fonctions de partition	22
1.5.2 $Oc(G)$ comme bi-module sur $\mathcal{A}(G)$ : matrices $W_{ij}$ et $W_{xy}$	23
1.5.3 Relations de compatibilité algébrique	24
1.6 Un exemple de symétries quantiques des graphes du système $SU(2)$ , les graphe $A_2$ .	26
1.6.1 L'algèbre $(\mathcal{B}, \circ)$	27
1.6.2 La cogèbre $(\mathcal{B}, \Delta)$	29
1.6.3 L'algèbre dual $(\widehat{\mathcal{B}}, \widehat{\circ})$	31
1.6.4 Algèbre de fusion et algèbre de symétries quantiques	34

1.7	Un exemple de symétries quantiques des graphes du système $SU(3)$ , les graphes $\mathcal{A}_1$ .	34
<b>2</b>	<b>La méthode de scission modulaire.</b>	<b>47</b>
2.1	Introduction	48
2.2	CFT and graphs	49
2.2.1	Steps of the resolution	50
2.3	From the modular invariant to graphs	51
2.3.1	Determination of toric matrices $W_{x_0}$	51
2.3.2	Determination of double toric matrices $W_{xy}$	54
2.3.3	Determination of the Ocneanu algebra $O_x$	55
2.3.4	Determination of the higher ADE graph $G$	56
2.3.5	Comments	57
2.4	Examples	58
2.4.1	The $E_6$ case of $\widehat{su}(2)$	58
2.4.2	The $\mathcal{E}_5$ case of $\widehat{su}(3)$	60
2.4.3	The $\mathcal{E}_5^*$ case of $\widehat{su}(3)$	64
2.4.4	The $\mathcal{E}_9$ case of $su(3)$	66
<b>3</b>	<b>Symétries quantiques et graphes non-simplement lacés.</b>	<b>83</b>
3.1	Considérations générales.	84
3.1.1	Pliage des graphes $ADE$ , fonctions de partition et propriétés modulaires des graphes non-simplement lacés.	84
3.1.2	La méthode de scission modulaire et les symétries quantiques des graphes non-simplement lacés.	87
3.2	Étude explicite des graphes non-simplement lacés de $SU(2)$ .	90
3.2.1	Le cas $F_4$ .	90
3.2.2	Le cas $B_3$ .	105
3.2.3	Le cas $B_4$ .	112
3.2.4	Le cas général $B_n$ .	119
3.2.5	Le cas $G_2$ .	122
3.3	Un exemple non-simplement lacé du système $SU(3)$ .	132

### Résumé.

Etant donné une algèbre de fusion à un certain niveau et la fonction de partition invariante modulaire pour une théorie de champs conformes correspondante, il existe une équation dite “équation de scission modulaire” traduisant la compatibilité, au niveau de la fonction de partition, entre l’action de l’algèbre de fusion et celle des symétries quantiques (qui sont a priori inconnues). Cette équation due à A. Ocneanu permet, en principe, de construire l’algèbre des symétries quantiques d’une théorie à partir des autres données évoquées plus haut et il est certain que son auteur a utilisé une telle méthode pour obtenir celles associées aux invariants modulaires de type SU2, SU3 et SU4. Cependant, aucun document présentant une technique de résolution de cette équation n’était disponible, sous forme publiée ou non, avant le travail présenté ici.

L’utilisation de la technique de résolution présentée permet, bien entendu, de retrouver les résultats connus concernant les symétries quantiques des théories qui correspondent aux fonctions de partition invariantes modulaire, et qu’on sait associer à des graphes simplement lacés de la famille SU2 (les graphes ADE) ou à leurs généralisations. Elle permet également de déterminer des algèbres de symétries quantiques dans le cadre un peu plus général, dit “non simplement lacé” ; dans ce cas, les fonctions de partition ne sont invariantes que par un certain sous groupe du groupe modulaire. Dans la famille SU2, nous avons examiné les cas  $F_4$ ,  $B_3$ ,  $B_4$ , et  $G_2$ . Dans la famille SU3, nous avons examiné le graphe non simplement lacé  $\mathcal{F}_5$  qui est un  $Z_3$  quotient de l’exceptionnel simplement lacé  $\mathcal{E}_5$  de même niveau. Dans tous les cas, l’espace vectoriel du graphe considéré est lui-même un module sur l’algèbre de fusion de même niveau, qui est une algèbre de type  $A$  (résultat connu, tout au moins pour la série SU2, depuis [34] et [37]). Par contre, ce module, qui est un  $Z_+$  - module, n’est pas “rigide”, en ce sens que ses constantes de structure ne vérifient pas la propriété de symétrie usuelle  $(F_n)_{ab} = (F_{\bar{n}})_{ba}$ , la notation  $\bar{n}$  désignant le “dual” (conjugué) de  $n$  dans l’algèbre de fusion (pour  $SU(2)$ , on a  $\bar{n} = n$ ), ce qui est d’ailleurs bien évident puisque ces constantes sont déterminées par la matrice d’adjacence du graphe lui-même, qui, par hypothèse, n’est pas simplement lacé.

Dans les cas ordinaires (simplement lacés), on sait associer, à toute théorie conforme invariante modulaire, deux algèbres en dualité (plus précisément, un groupoïde quantique) dont les anneaux de caractères s’identifient à l’algèbre de fusion, d’une part, et à l’algèbre des symétries quantiques, d’autre part. Pour tous les cas non - simplement lacés examinés, nous avons déterminé la décomposition par blocs (il s’agit d’algèbres de dimension finie semi - simples) des deux algèbres qui, pour une situation simplement lacée, devraient avoir la même dimension totale, les deux espaces vectoriels sous jacents étant en dualité. Nous ne nous attendions pas, dans notre cas, à obtenir une structure aussi simple du fait des propriétés inhabituelles des modules, mais il s’avère que l’introduction de facteurs correctifs très simples (essentiellement justifiés par l’existence d’une action de groupe finie sur le graphe correspon-

dant) permet d'identifier les dimensions obtenues. Ce travail suggère donc l'existence d'une nouvelle structure algébrique, finalement assez "simple" lié au exemples non-simplement lacés. Nous n'avons pas cherché à aller plus loin dans cette direction, réservant ce travail pour une recherche ultérieure.

Le formalisme mathématique utilisé dans cette thèse est volontairement assez élémentaire. Notre travail pourrait néanmoins être transcrit dans un cadre plus sophistiqué utilisant soit le langage de la théorie des algèbres d'opérateurs, soit encore, et plus facilement sans doute, celui des catégories de fusion (voir [60], [49]). Au niveau physique, les techniques et résultats présentés peuvent être utilisés en théorie de champs conforme, plus particulièrement dans l'analyse des conditions de bord, et dans leurs applications.

### **Bref résumé.**

Le premier objet de cette thèse est de présenter une méthode de résolution pour l'équation de scission modulaire, équation qui permet de déterminer les symétries quantiques d'une théorie de champs conforme. On peut l'utiliser dans le cadre des théories associées aux graphes simplement lacés (les ADE de la famille SU2, ou leurs généralisations) et retrouver ainsi des résultats connus, en particulier la structure des groupoides quantiques associés. Le second objet de cette thèse est d'appliquer cette technique dans le cadre plus général des graphes non simplement lacés afin de déterminer les algèbres de symétries quantiques correspondantes, et d'explorer leurs propriétés. Plusieurs exemples de ce type sont analysés.

# Introduction

L'étude des symétries quantiques associées aux graphes de Dynkin et ses généralisations trouve son origine dans leur participation à la classification des théories conformes à deux dimensions proposé par A. Cappelli, C. Itzykson and J.B. Zuber en 1987 [16]. Dans cette classification apparaissent deux séries infinies de graphes :  $A_n$  et  $D_n$  et trois graphes exceptionnels  $E_6$ ,  $E_7$  et  $E_8$ . Ces graphes constituent un sous-ensemble des graphes de Dynkin (tous les graphes simplement lacés) qui, dans un autre contexte, conduisent à la classification des algèbres de Lie semi-simples. La classification définie par les graphes  $ADE$  est telle que chaque fonction de partition d'une théorie de champs conformes avec algèbre de caractères  $\hat{su}(2)_\ell$  au niveau  $\ell$  correspond à un graphe  $ADE$  de nombre de Coxeter  $k = \ell + 2$ .

Les travaux de F. Di Francesco et J. B. Zuber [34] ont permis d'élargir cette classification aux théories de type  $\hat{su}(3)$ . Ils ont proposé une nouvelle liste de graphes généralisant les graphes  $ADE$  et qui jouent le même rôle dans la classification. Ces graphes sont appelés les graphes de Di Francesco-Zuber, ils sont composés de quatre séries infinies :  $\mathcal{A}_n$ , son conjugué  $\mathcal{A}_n^c$  ; plus le graphe orbifold  $\mathcal{D}_n = \mathcal{A}_n/\mathbb{Z}_3$  et son conjugué  $\mathcal{D}_n^*$ . Il y a aussi sept graphes exceptionnels  $\mathcal{E}_5$ ,  $\mathcal{E}_5/\mathbb{Z}_3$ ,  $\mathcal{D}_9^t$ ,  $\mathcal{D}_9^{t*}$ ,  $\mathcal{E}_{21}$ ,  $\mathcal{E}_9$ , et  $\mathcal{E}_5/\mathbb{Z}_3$ , les deux derniers associés à la même fonction de partition.

Les travaux d'A. Ocneanu réalisés dans les années quatre-vingt dix [57], [59] ont changé radicalement cette vision des relations existant entre les propriétés combinatoires des graphes  $ADE$  et la classification des fonctions de partition. La structure algébrique qui a été découverte à la base de cette classification est un sujet d'études très intéressant en lui-même, et a donné lieu à des travaux étudiant des aspects qui vont des considérations mathématiques les plus formelles, [28],[6, 7, 8], [11] ; jusqu'à des applications dans différents domaines de la physique théorique, comme les systèmes intégrables et les théories de cordes [38], [29], [67] [69].

La propriété qui se trouve à la base de toute la structure algébrique proposée (et que était déjà mentionné dans [62]) est que les vertex du diagramme  $A_n$  engendrent un espace vectoriel sur lequel il est possible de construire une structure d'algèbre finie, associative et commutative. Ces algèbres, appelées algèbres de fusion, sont telles que sa table de multiplication peut-être construite à partir du graphe même : en effet l'algèbre  $A_n$  possède un élément neutre et un générateur donnés par les deux premiers vertex à gauche,  $v_0$  et  $v_1$ . La multiplication

d'un vertex  $v_i$  par le générateur est déterminé par la somme des voisins de  $v_i$ . Nous avons :  $v_1 v_i = v_{i+1} + v_{i-1}$  pour  $i < n-1$  et  $v_1 v_i = v_{i-1}$  si  $i = n-1$ . A partir de la multiplication par le générateur il est alors possible d'écrire chaque vertex du graphe comme un polynôme en  $v_0$  et  $v_1$ , et un produit associatif peut être construit. Le produit de l'algèbre  $A_n$  a des constants de structures toutes non négatives et entières, c'est à dire que l'algèbre de fusion se comporte comme l'équivalent quantique d'un produit de spins (*SU(2) classical recoupling theory*) qui est codé par le graphe  $A_\infty$ .

Cette structure d'algèbre peut être étendue à l'espace vectoriel engendré par les vertex de certains graphes de la famille *ADE* différents des graphes  $A_n$ , notamment les graphes  $D_{2n}$ ,  $E_6$  et  $E_8$ . Néanmoins la propriété générale (et fondamentale) que possèdent tous les graphes *ADE* (et qui s'étend à d'autres types de diagrammes) est que l'espace vectoriel du graphe est toujours un module sur un graphe  $A_n$  avec la même norme, noté  $\mathcal{A}(G)$ .

La construction d'Ocneanu associe à chaque graphe *ADE* un type particulier de groupoïde quantique  $\mathcal{B}$  qui est de dimension finie et peut être construit à partir de l'action de  $\mathcal{A}(G)$  sur  $G$  d'une manière que nous allons expliquer en détail plus tard.  $\mathcal{B}$  est une algèbre semi-simple et une cogèbre cosemi-simple, l'existence d'un coproduit dans l'algèbre  $\mathcal{B}$  et son dual permet de décomposer le produit tensoriel de représentations (ou coreprésentations) irréductibles et les décomposer en somme de représentations (coreprésentations) irréductibles. Nous obtenons de cette manière deux algèbres de caractères différentes : la première, dénommée algèbre de fusion de  $G$ , coïncide avec l'algèbre de graphe  $\mathcal{A}(G)$ . La deuxième est une algèbre associative (mais pas nécessairement commutative) de dimension finie dénommée **algèbre de symétries quantiques**  $Oc(G)$ . L'algèbre de symétries quantiques est générée par deux éléments notés  $1$  et  $1'$ , elle est obtenue avec une base particulière qui est telle que la multiplication de ses éléments par les deux générateurs est codée par un graphe appelé graphe d'Ocneanu  $Oc(G)$ .

Trois graphes participent à cette construction :  $G$ ,  $\mathcal{A}(G)$  et  $Oc(G)$ . Ils sont liés par plusieurs propriétés intéressantes parmi lesquelles il est important de remarquer les différents actions de module. Nous avons déjà indiqué que la constructions du groupoïde quantique  $\mathcal{B}$  peut se faire à partir de l'action de  $\mathcal{A}(G)$  sur  $G$ . Il existe aussi une double action d' $\mathcal{A}(G)$  sur  $Oc(G)$  :  $\mathcal{A}(G) \times Oc(G) \times \mathcal{A}(G) \rightarrow Oc(G)$ , qu'est compatible avec la multiplication de  $Oc(G)$ . Cette famille de trois graphes, ou plutôt des algèbre et des modules qui leur correspondent, constituent ce que nous appellerons **symétries quantique de l'invariant modulaire**.

La double action de  $\mathcal{A}(G)$  sur  $Oc(G)$  est codée par une collection de matrices avec entrées entières et non négatives appelées **matrices toriques**  $W_{x,y}$ . Il existe une matrice torique pour chaque vertex du graphe d'Ocneanu (notés  $x, y, z$ ), et l'action de bimodule s'écrit :

$$i x j = \sum_{y \in Oc(G)} (W_{x,y})_{i,j} y$$

Les matrices toriques établissent le lien avec les théories conformes. Nous allons considérer les théories de champs conformes à deux dimensions dont algèbre de symétrie est une algèbre

de courants contenant l'algèbre de Virasoro, plus une algèbre de Lie affine  $\hat{su}(2)_\ell$ . Les conditions de bord sont choisies périodiques et paramétrées par  $\tau = w_2/w_1$  où  $w_1$  et  $w_2$  déterminent la périodicité dans les deux directions d'un tore [42], [31]. Du point de vue de la théorie des champs, la fonction de partition code l'ensemble des champs contenus dans la théorie, et doit satisfaire deux conditions fondamentales : a) le contenu en champs codé par la fonction de partition est compatible avec une algèbre de produit d'opérateurs (OPA) et b) la théorie est invariante sous l'action du groupe modulaire. Au niveau  $\ell$ , la fonction de partition de la théorie s'écrit en termes des caractères de l'algèbre affine, avec un contenu en champs codé par une matrice à entrées entières et non négatives  $\mathcal{M}$ , appelée **l'invariant modulaire**.

$$Z(\tau) = \sum_{i,j=1}^{\ell+1} \chi(\tau)_i \mathcal{M}_{ij} \bar{\chi}(\tau)_j.$$

L'invariance sous l'action du groupe modulaire peut-être prouvée directement en vérifiant la commutativité de  $\mathcal{M}$  avec les matrices représentant les générateurs du groupe modulaire  $S$  et  $T$ .

L'observation fondamentale est que **l'invariant modulaire coïncide avec la matrice torique associée à l'élément neutre de l'algèbre de symétries quantiques**, c'est à dire nous avons l'identification  $\mathcal{M} = W_{0,0}$ . Les matrices toriques  $W_{x,y}$  associées aux autres vertex du graphe d'Ocneanu ne possèdent pas la propriété d'invariance sous l'action du groupe modulaire, et sont interprétées comme donnant des fonctions de partition pour des théories conformes avec conditions de bord définies par le choix du graphe  $G$  et lignes de défauts caractérisées par le couple  $(x, y)$  [24], [63].

La structure formelle que nous venons de décrire est bien établie pour les graphes  $ADE$  et est suffisamment générale pour permettre à priori une généralisation aux cas  $SU(N)$ , mais la réalisation explicite de  $\mathcal{B}$  est un problème complexe qui n'a pas été résolu que pour certains cas très simples, d'autant plus que la liste de graphes de Coxeter-Dynkin généralisés n'est connue que pour les systèmes  $SU(3)$  et  $SU(4)$ .

Nous connaissons explicitement la bigèbre  $\mathcal{B}$  pour les cas  $A_2$ ,  $A_3$  et  $A_4$  [19], [66], [20] et nous savons désormais comment se présentera cette structure pour les cas  $A_n$  en général. A titre d'illustration nous allons présenter l'exemple de la bigèbre associée au cas  $\mathcal{A}_1$  du système  $SU(3)$ , ceci permet de montrer quelques similitudes et différences par rapport aux cas  $SU(2)$ , mais la structure plus générale décrivant les cas  $\mathcal{A}_\ell$  du système  $SU(3)$  devrait encore être explicitée.

La complexité de la solution formelle de ce problème nous oblige à adopter un point de vue différent permettant d'obtenir des informations sur les différents ingrédients de l'ensemble, sans pourtant être obligés de construire explicitement le grupoïde quantique  $\mathcal{B}$ . D'un autre côté, l'existence de plusieurs algorithmes, la plupart dus aux travaux de T. Gannon [43] permettent d'obtenir des candidats fournissant des invariants modulaires pour  $SU(N)$  quelconque. Ceci suggère de prendre l'invariant modulaire comme point de départ et d'obtenir

à partir de celui-ci des informations sur la structure de  $\mathcal{B}$ . C'est d'ailleurs ce point de vue qui avait été adopté par A. Ocneanu, et celui sur lequel repose également le travail principal de cette thèse, à savoir, l'étude des méthodes permettant d'explorer les différents exemples et leurs symétries quantiques.

Notre travail est centré sur le développement et l'application d'une méthode appelée **méthode de scission modulaire**, permettant d'obtenir à partir d'un invariant modulaire donnée, l'ensemble des matrices toriques, le graphe d'Ocneanu et une réalisation matricielle de l'algèbre des symétries quantiques, sans avoir besoin de construire explicitement le groupoïde  $\mathcal{B}$ .

Ces résultats permettent, dans la plupart des cas de déterminer explicitement l'algèbre  $Oc(G)$  et le graphe de Coxeter  $G$  associé à un invariant modulaire. Dans cette approche le graphe  $G$  n'est pas considéré comme une donnée de départ, mais fait partie des résultats obtenus par l'application de la méthode.

La méthode de scission modulaire consiste à résoudre une équation traduisant la compatibilité de la double action de  $\mathcal{A}(G)$  sur  $Oc(G)$ , elle contient les constantes de structure de l'algèbre  $\mathcal{A}(G)$  dénotés par  $N_i$ , l'invariant modulaire, et les matrices toriques (constantes de structure du bimodule  $Oc(G)$  sur  $\mathcal{A}(G)$ ) combinés dans l'ensemble d'équations matricielles :

$$\sum_z (W_{0z})_{i,j} W_{z0} = N_i \mathcal{M} N_j^{tr} .$$

Les matrices  $N_i$  sont connues puisque elles peuvent être calculés à partir du graphe  $\mathcal{A}(G)$ , nous avons alors un système d'équations avec des inconnues données par les entrées les matrices toriques  $W_{0,z}$  et  $W_{z,0}$ , ce système est soumis à des contraintes puisqu'on demande que les entrées de  $W_{x,y}$  soient des entiers-non négatif. Ces contraintes réduisent suffisamment les degrés de liberté du système pour qu'il soit possible de déterminer l'ensemble complet de matrices toriques.

Un des aspects primordiaux de cette méthode réside dans le fait que elle permet d'explorer le problème des symétries quantiques des invariants modulaires de haut niveaux. Nous avons étudié les cas  $\mathcal{E}_5^*$ ,  $\mathcal{E}_9$  et  $\mathcal{E}_9/\mathbb{Z}_3$  du système  $SU(3)$ . Les deux dernier graphes apparaissent comme sous graphes du même graphe d'Ocneanu. Le cas  $\mathcal{E}_5^*$  est un exemple où le graphe lui-même n'apparaît pas explicitement dans  $Oc(G)$ , mais il peut être déterminé de manière relativement simple en lui demandant de satisfaire à différentes relations de module.

Un deuxième aspect est l'exploration d'un systèmes de graphes qui n'a pas été étudié jusqu'à présent. En effet il est possible sous certaines conditions de construire une restriction d'un invariant modulaire, telle que la compatibilité avec une OPA soit gardée mais où l'invariance modulaire est substituée par l'invariance sous l'action d'un sous-groupe du groupe modulaire [74], [73]. Des exemples de telles restrictions sont obtenues à partir des théories connues en utilisant un quotient par les groupes de symétrie ( $\mathbb{Z}_2$  ou  $\mathbb{Z}_3$  dans les cas considérés). Ces quotients donnent origine à des théories associées aux graphes non *ADE*, plus précisément les

graphes non-simplement lacés  $B_n$ ,  $C_n$ ,  $F_4$  et  $G_2$  pour le système  $SU(2)$  et ses généralisations pour  $SU(3)$ .

Partant une matrice modulaire (la fonction de partition) issue d'une telle restriction, la méthode de scission modulaire permet d'explorer les propriétés algébriques qui, éventuellement, amènent à des structures de type "symétries quantiques". L'objectif n'est pas de proposer ou d'étudier une théorie physique de champs conformes associé, mais de regarder comment se généralisent les propriétés et structures algébriques associées aux graphes  $ADE$ . Les résultats sont en effet intéressants, nous trouvons que des relations similaires aux symétries quantiques des graphes  $ADE$  relient les graphes qui apparaissent dans le problème, ceci indique qu'une structure semblable à la bigèbre  $\mathcal{B}$  doit exister ici aussi, mais une généralisation est nécessaire pour pouvoir décrire la structure formellement. Il faut remarquer que dans l'étude des matrices modulaires, les graphes de Dynkin non-simplement lacés apparaissent de manière directe ou indirecte comme resultat des calculs.

La structure de la thèse est la suivante : le premier chapitre est dédié à la description de la théorie de groupoïdes quantiques associé aux graphes  $ADE$ . Les premières sections présentent un résumé des aspect les plus importants de la description de l'espace  $\mathcal{B}$  et ses propriétés algébriques. L'objectif étant uniquement de fournir un cadre pour le reste de la thèse. Des études complètes de ses aspects peuvent être trouvés dans diverses references [20], [19], [28], [6, 7, 8]. Dans les deux dernières sections nous présentons deux exemples illustrant la construction de  $\mathcal{B}$  pour des cas précis. Le premier, purement illustratif, traite le cas  $A_2$  du système  $SU(2)$  déjà décrit dans [19]. Nous contruisons pour cette exemple l'espace  $\mathcal{B}$  a partir de l'algèbre de graphe  $A_2$ , le coproduit et les deux algèbres de caractères associées. Le deuxième exemple est plus intéressant, il s'agit du calcul du cas  $\mathcal{A}_1$  du système  $SU(3)$ . La remarque est que le système de cellules n'est pas formellement connu pour les cas  $SU(3)$ , et le calcul se fait par analogie avec le cas  $SU(2)$ .

Le deuxième chapitre est constitué par l'article *From modular invariant to graphs : the modular splitting method* [47] où est présentée la méthode de scission modulaire. Le papier est organisé comme suit. La première section est dédiée à l'introduction de l'équation de scission modulaire et à une description générale et détaillée de la méthode de résolution. Les sections suivantes sont consacrés a l'illustration de la technique en l'appliquant à trois exemples choisis, en premier lieu nous traitons le cas  $E_6$  du système  $SU(2)$ , ensuite nous considérons l'étude de trois cas exceptionnels du système  $SU(3)$ , d'abord le cas  $\mathcal{E}_5$  au niveau 5, et le cas module conjugué  $\mathcal{E}_5^*$ , et enfin l'exemple  $\mathcal{E}_9$  au niveau 9.

Dans le troisième chapitre sont présentés les résultats concernant l'explorations des symétries quantiques des graphes non-simplement lacés. Le travail est basé sur les méthodes et résultats de l'exemple  $F_4$  qui est étudié dans [25]. Ce travail est à la fois le premier traitement du cas non-simplement lacé du point de vue des symmetries quantiques, et le cas qui a fourni les bases pour les généralisations.

La première section contient les considérations générales sur les méthodes et résultats

concernant les graphes non-simplement lacés du système  $SU(2)$ . Obtention des fonctions de partition des graphes non-simplement lacés par restriction de celles des graphes  $ADE$ , description de la méthode de scission modulaire adaptée à l'étude des graphes  $SU(2)$  non-simplement lacés, résultats généraux. La deuxième section est dédiée à l'étude explicite des exemples du système  $SU(2)$ , on considère explicitement les cas  $F_4$ ,  $B_3$ ,  $B_4$ , le cas général  $B_n$  et le graphe  $G_2$ , dans chaque cas nous calculons l'ensemble des matrices toriques, l'algèbre de symétries quantiques et nous regardons de quelle façon la règle de somme quadratique est modifiée, ce qui donne ainsi une idée sur la structure algébrique qu'il faudrait savoir associer à ce type de graphes. La troisième section contient l'étude d'un cas non-ADE du système  $SU(3)$ , ce cas est construit comme l'analogue de l'exemple  $F_4$  de  $SU(2)$ , mais les résultats ne constituent pas une généralisation directe du cas  $SU(2)$ .

# Chapitre 1

## Symétries quantiques de graphes *ADE*.

### 1.1 Notions sur les graphes et graphes *ADE*.

Nous commençons par donner la définition d'un graphe et certaines propriétés de base que seront d'importance pour notre travail.

**Définition 1** Nous définissons un **graphe**  $G$  par la donnée d'un triplet  $(V, A, \psi)$  tel que :

- $V$  est un ensemble non-vide d'éléments  $v$  appelés *vertex*,
- $A$  est un ensemble non vide d'éléments  $\xi$  appelés *arêtes*,
- $\psi$  est une fonction qui associe à chaque arc de  $G$  une paire ordonnée de vertex (non nécessairement distincts) de  $G$ .

Un graphe est dit **fini** si les ensembles  $V$  et  $A$  sont finis, le nombre de vertex d'un graphe est appelé l'ordre du graphe. Si  $\xi$  est un arc,  $i$  et  $j$  deux vertex tels que  $\psi(\xi) = ij$ , alors  $\xi$  joint le vertex  $i$  au vertex  $j$ , et nous notons un tel arc  $\xi_{ij}$  ou  $\vec{i}j$ . Nous appelons  $s(\xi_{ij}) = i$  la **source** de  $\xi_{ij}$  et  $r(\xi_{ij}) = j$  l'**extrémité** de  $\xi_{ij}$ . Un arc ayant la même source et extrémité est appelé une **boucle**. Un graphe est dit **simple** s'il ne possède pas de boucle et si deux arcs différents ne relient pas la même paire de points ; si le graphe possède des arêtes multiples il est appelé **non-simplement lacé**. Un graphe est dit **bi-orienté** si pour tout arc  $\xi_{ij}$  reliant  $i$  à  $j$ , il existe l'arc inverse  $\xi_{ji}$  reliant  $j$  à  $i$ . Dans le cas contraire, le graphe est dit **orienté**. L'arc  $\xi_{ij}$  est représenté par une flèche reliant le vertex  $i$  au vertex  $j$ . Dans le cas d'un graphe bi-orienté, les deux arcs  $\xi_{ij}$  et son inverse sont représentés plus simplement par une seule ligne (non-fléchée) reliant  $i$  et  $j$ .

Un **chemin élémentaire** est une séquence  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)$  d'arcs telle que l'extrémité de chaque arc coïncide avec la source de l'arc suivant :  $r(\xi_i) = s(\xi_{i+1}), 1 \leq i \leq k - 1$ . Un graphe est dit **fortement connexe** si pour tout couple de vertex  $i$  et  $j$ , il existe un chemin élémentaire reliant ces vertex.

**Définition 2** Soit  $G$  un graphe à  $d_G$  vertex. La **matrice d'adjacence** de  $G$  est la matrice  $d_G \times d_G$  noté  $Ad(G)$  ayant comme entrée  $Ad(G)_{ij} = n$  s'il existe  $n$  arcs  $\xi_{ij}$  reliant le vertex  $i$  au vertex  $j$ , et  $Ad(G)_{ij} = 0$  sinon.

**Définition 3** Une matrice  $A$  carrée ( $n \times n$ ) à entrées dans les entiers non-négatifs est dite **irréductible** si et seulement si, pour chaque  $i, j \in \{1, \dots, n\}$ , il existe un entier positif  $k$  (qui peut dépendre de  $i$  et  $j$ ), tel que  $(A^k)_{ij} > 0$ .

Nous avons vu plus haut la définition d'un chemin élémentaire. Il existe une manière très simple de compter le nombre de tels chemins de longueur  $k$  fixée.

**Théorème 1** [1] Si  $Ad$  est la matrice d'adjacence d'un graphe à  $n$  vertex, alors le nombre de chemins élémentaires distincts de longueur  $k$  reliant les vertex  $i$  et  $j$  est égal à  $(Ad^k)_{ij}$ .

Puisque, par définition, dans un graphe fortement connecté il existe au moins un chemin reliant tout vertex  $i$  à un vertex  $j$ , sa matrice d'adjacence est donc irréductible.

**Théorème 2 (Perron-Frobenius)** [45] Soit  $A$  une matrice carrée irréductible à entrées dans les entiers non négatifs. Alors, il existe une valeur propre  $\beta$  de  $A$  telle que :

- $\beta$  est réelle,  $\beta > 0$  ;
- $\beta$  est la plus grande valeur propre de  $A$  ;
- le vecteur propre correspondant à  $\beta$  est positif<sup>1</sup>, et est unique à une constante multiplicative près.

Ce vecteur-propre est appelé vecteur de Perron-Frobenius, et sera noté  $P$ . Il satisfait donc à l'équation suivante :

$$Ad(G)P = \beta P \quad (1.1)$$

Soit  $\{v_1, v_2, \dots, v_r\}$  une base des vertex du graphe  $G$  : puisque la matrice d'adjacence de  $G$  est irréductible à entrées dans  $\mathbb{N}$ , le **Théorème 2** s'applique, et nous définissons l'application  $\mu$  donnant la composante de Perron-Frobenius des vertex :

$$\begin{aligned} \mu : V(G) &\longmapsto \mathbb{R}^+ \\ i &\longmapsto P(i) \end{aligned}$$

Nous normalisons ce vecteur de telle manière que  $\mu(v_1) = 1$ , où  $v_1$  est choisi comme étant le vertex<sup>2</sup> ayant la plus petite composante  $P(i)$

<sup>1</sup>Toutes ses composantes ont le même signe.

<sup>2</sup>Dans les cas considérés, il n'y aura pas d'ambiguïté sur le choix de ce vertex.

### 1.1.1 Graphes bi-orientés et leur classification

Dans le cas d'un graphe  $G$  bi-orienté, sa matrice d'adjacence est symétrique, et sa norme est alors donnée par :

$$\|G\| = \|Ad(G)\| = \max\{|\lambda|, \text{où } \lambda \text{ est valeur propre de } Ad(G)\}$$

Il existe une classification reliant les valeurs possibles de cette norme et son graphe correspondant [45] :

**Théorème 3** *Soit  $A$  une matrice carrée symétrique à entrée dans les entiers non-négatifs.*

*Alors :*

- $\|A\| = 2$  si et seulement si  $A$  est la matrice  $(\ell + 1) \times (\ell + 1)$  d'adjacence de l'un des graphes suivants :

$$A_\ell^{(1)}(\ell \geq 2), \quad D_\ell^{(1)}(\ell \geq 4), \quad E_\ell^{(1)}(\ell = 6, 7, 8)$$

- $\|A\| < 2$  si et seulement si  $A$  est la matrice  $(\ell \times \ell)$  d'adjacence de l'un des graphes suivants :

$$A_\ell(\ell \geq 2), \quad D_\ell(\ell \geq 4), \quad E_\ell(\ell = 6, 7, 8)$$

De plus,  $\|A\| = \beta = 2 \cos(\frac{\pi}{\kappa})$ , où  $\kappa$  est par définition le nombre (dual) de Coxeter du graphe. Les autres valeurs propres de  $A$  peuvent être exprimés en termes de  $\kappa$  comme  $\lambda = 2 \cos(\frac{m\pi}{\kappa})$  (possiblement avec multiplicité), où les nombres  $m$  sont appelés exposants de Coxeter.

Les graphes définis ci-dessus correspondent aux diagrammes de Dynkin des algèbres de Lie semi-simples simplement lacées  $(A_\ell, D_\ell, E_\ell)$  (voir [2],[42]), ou de leur extension affine  $(A_\ell^{(1)}, D_\ell^{(1)}, E_\ell^{(1)})$  (voir [42]). Insistons sur le fait que nous n'utiliserons pas la notion d'algèbre de Lie ici (le nombre dual de Coxeter par exemple est défini à travers la norme du graphe).

**Correspondance de Mc-Kay** Les vertex des diagrammes affines  $(A_\ell^{(1)}, D_\ell^{(1)}, E_\ell^{(1)})$  sont en correspondance bi-univoque avec les représentations irréductibles des sous-groupes du groupe  $SU(2)$ , et la composante de Perron-Frobenius de ces vertex est égale à la dimension des représentations irréductibles (irreps) : c'est la correspondance de Mc-Kay classique [51]. De même, les vertex des diagrammes  $(A_\ell, D_\ell, E_\ell)$  peuvent être mis en correspondance avec les irreps de "sous-groupes" ou "modules" associés au groupe quantique  $U_q(sl(2))$ , avec  $q$  racine de l'unité dépendant du niveau  $\ell$ , les composantes de Perron-Frobenius donnant, par définition, les dimensions quantiques de ces irreps (ce ne sont plus des nombres entiers, mais des  $q$ -nombres !). C'est l'analogie quantique de la correspondance de Mc-Kay.

## 1.2 Produit de représentations irréductibles et graphes $\mathcal{A}$

### 1.2.1 Cas classique

Considérons le groupe  $SU(N)$  et ses représentations irréductibles notés par sa dimension  $i, j, k \in \text{Irr } SU(N)$ . Ce groupe possède  $N - 1$  représentations fondamentales, en ce sens que les autres représentations irréductibles peuvent être obtenues par tensorialisation puis réduction à partir des fondamentales. Chaque représentation fondamentale donne lieu à un graphe infini, dont les vertex sont labellés par  $i \in \text{Irr } SU(N)$  et dont les arcs correspondent à la tensorialisation par la représentation fondamentale.

Par exemple le groupe  $SU(2)$  possède une représentation fondamentale, de dimension deux, notée 2, et la décomposition du produit tensoriel d'une irrep  $i \in \text{Irr } SU(2)$  par la fondamentale 2 est donnée par la formule suivante (correspondant au couplage d'une particule de spin 1/2 avec une particule de spin  $J = (i - 1)/2$ ) :

$$2 \otimes i = i - 1 \oplus i + 1. \quad (1.2)$$

Le résultat de cette décomposition peut être codé dans le graphe  $A_\infty$  de  $SU(2)$  illustré Fig.1.1.

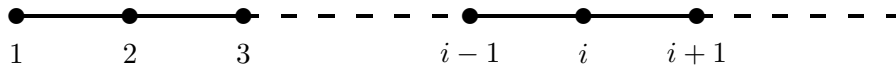


FIG. 1.1 – Graphe  $A_\infty$  de  $SU(2)$ .

Les vertex de ce graphe sont labellés par les irreps  $i, j, k \in \text{Irr } SU(2)$ , et  $2 \otimes i$  se décompose en la somme directe des voisins de  $i$  sur le graphe.

Le groupe  $SU(3)$  possède deux représentations fondamentales, notées 3 et  $\bar{3}$ , chacune donnant lieu à un graphe orienté infini  $A_\infty$ . Les représentations 3 et  $\bar{3}$  étant conjuguées, le graphe correspondant à la tensorialisation par  $\bar{3}$  s'obtient en inversant la direction des arcs du graphe correspondant à 3. Le graphe  $A_\infty$  de  $SU(3)$  correspondant à la représentation 3 est illustré Fig. 1.2. Nous lisons sur le graphe, par exemple :  $3 \otimes 3 = \bar{3} \oplus 6$ , car il y a un arc reliant 3 à  $\bar{3}$  et un arc reliant 3 à 6.

### 1.2.2 Cas quantique

Les groupes de Lie possèdent en général des déformations quantiques (groupes quantiques), dont un exemple bien connu est fourni par le groupe quantique  $U_q(sl(N))$ . A  $q$  racine de l'unité nous pouvons définir des quotients de Hopf non semi-simples, de dimension finie – génériquement désignés par  $u_q(sl(N))$  – à partir du groupe quantique  $U_q(sl(N))$  : ces groupes quantiques possèdent alors un nombre fini de représentations irréductibles (nous



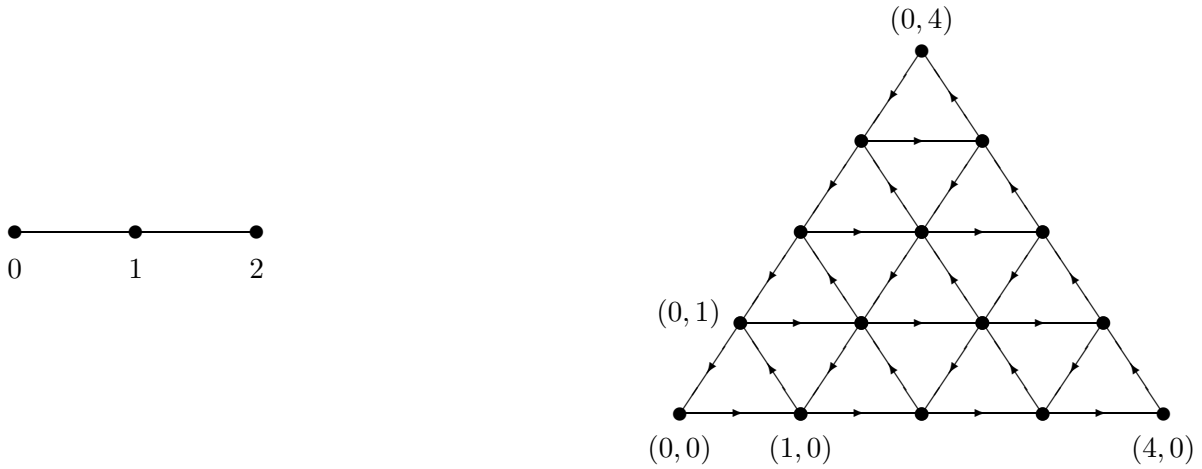


FIG. 1.3 – Les graphes  $\mathcal{A}_2$  pour  $SU(2)_2$  (3 vertex) et  $\mathcal{A}_4$   $SU(3)_4$  (15 vertex).

### 1.2.3 Algèbre de graphe et matrices $N_i$

A partir du graphe  $\mathcal{A}_\ell$  il est possible de calculer une table de multiplication associative et fermée pour toutes les irreps, rappelons que pour  $q$  racine de l'unité le nombre d'irreps est finie. La multiplication de deux irreps est donnée par l'équation suivante :

$$i \cdot j = \sum_k N_{ij}^k k, \quad (1.4)$$

où  $N_{ij}^k$  sont des nombres entiers non-négatifs (multiplicité de  $(k)$  dans  $(i) \cdot (j)$ ). Nous appelons cette algèbre l'**algèbre du graphe**  $\mathcal{A}_\ell$ , algèbre de fusion, ou plus simplement l'algèbre  $\mathcal{A}_\ell$ .

**Exemple du système  $SU(2)_\ell$  : cas  $A_3$**  Nous allons considérer le graphes  $A_3$  du système montré dans la Figure 1.3. Nous savons multiplier par l'identité 0 (puisque c'est l'identité) et par la fondamentale 1 (à l'aide du graphe) :

$$1 \cdot 0 = 0 \cdot 1 = 0, \quad 1 \cdot 1 = 0 + 2, \quad 1 \cdot 2 = 2 \cdot 1 = 1. \quad (1.5)$$

En imposant l'associativité, nous construisons la seule multiplication qui n'est pas donnée par le graphe dans cette exemple  $A_3$  :

$$2 \cdot 2 = (1 \cdot 1 - 0) \cdot 2 = 0 + 2 - 2 = 0. \quad (1.6)$$

Nous obtenons ainsi l'algèbre du graphe  $A_3$ , qui est l'algèbre commutative et associative ayant comme éléments de l'espace vectoriel les combinaisons linéaires des vertex  $\{0, 1, 2\}$ , et comme

multiplication :

$$\begin{array}{c|c|c|c}
 \cdot & 0 & 1 & 2 \\
 \hline
 0 & 0 & 1 & 2 \\
 \hline
 1 & 1 & 0+2 & 1 \\
 \hline
 2 & 2 & 1 & 0
 \end{array} \tag{1.7}$$

Nous associons à chaque vertex une matrice  $N_i$ , telle que  $(N_i)_{jk} = \mathcal{N}_{ij}^k$  donne les constants de structure de l'algèbre. Ces matrices  $N_i$  s'obtiennent directement par des formules (1.5) et (1.6) que se généralisent à la formule de récurrence (1.8).

Pour les graphes  $A_n$  en général la **formule de récurrence tronquée de  $SU(2)$**  est :

$$\left. \begin{array}{l}
 N_0 = \mathbf{1}_{n \times n} \\
 N_1 = Ad(A_n) \\
 N_1 \cdot N_i = N_{i-1} + N_{i-2} \quad i = 2, \dots, n-2 \\
 N_1 \cdot N_{n-1} = N_{n-2}
 \end{array} \right\} \tag{1.8}$$

où  $Ad(A_n)$  est la matrice d'adjacence du graphe  $A_n$ . Elles forment l'algèbre matricielle du graphe  $A_n$  et fournissent une représentation fidèle de l'algèbre de graphe  $A_n$  :

$$N_i \cdot N_j = \sum_k \mathcal{N}_{ij}^k N_k = \sum_k (N_i)_{jk} N_k \tag{1.9}$$

Pour  $SU(3)_\ell$ , nous pouvons suivre la même démarche. Connaissant le graphe  $\mathcal{A}_\ell$ , nous obtenons les matrices d'adjacence  $N_{(1,0)}$ ,  $N_{(0,1)}$  et nous pouvons construire l'algèbre du graphe  $\mathcal{A}_\ell$ , dont une représentation fidèle est donnée par les matrices  $N_i = N_{\lambda,\mu}$ . Ces matrices s'obtiennent par la **formule de récurrence tronquée de  $SU(3)$**  :

$$\left. \begin{array}{l}
 N_{\lambda,\mu} = 0 \quad \text{si } \lambda < 0 \text{ ou } \mu < 0 \\
 N_{\lambda,0} = N_{1,0}N_{\lambda-1,0} - N_{\lambda-2,1} \\
 N_{\lambda,\mu} = N_{1,0}N_{\lambda-1,\mu} - N_{\lambda-1,\mu-1} - N_{\lambda-2,\mu+1} \quad \text{si } \mu \neq 0 \\
 N_{0,\lambda} = N_{\lambda,0}^T
 \end{array} \right\} \tag{1.10}$$

où  $N^T$  désigne la matrice transposée de  $N$ .

### 1.2.4 $G$ comme module sur $\mathcal{A}(G)$ : matrices $F_i$ (ou $E_a$ )

Nous considerons maintenant tous les graphes  $ADE$  ou de Di Francesco-Zuber. Ils sont notés en général par la lettre  $G$  et ses vertex étiquetés en général par les index  $a, b, c \in \{0, 1, 2, \dots, d_G - 1\}$ , bien que cette notation puisse varier en fonction de la configuration du graphe, comme on le verra dans les exemples.

À chaque graphe  $G$  de type  $ADE$  ou de Di Francesco-Zuber est associé un graphe de type  $\mathcal{A}_n$ , noté  $\mathcal{A}(G)$ , le graphe  $\mathcal{A}(G)$  a le même nombre de Coxeter que  $G$  (si  $\kappa$  est le nombre de Coxeter de  $G$ , alors  $\mathcal{A}(G) = \mathcal{A}_{\kappa-N}$ ).

Les vertex de  $\mathcal{A}(G)$  forment un espace vectoriel et définissent l'algèbre de graphe  $\mathcal{A}_\ell$ , les vertex du graphe  $G$  forment aussi un espace vectoriel qui est noté lui aussi  $G$  (la distinction entre le graphe lui même et l'espace vectoriel généré par ces vertex vient du contexte), nous voulons définir une action de  $\mathcal{A}(G)$  sur  $G$ ,

**Propriété 1** *L'espace vectoriel  $G$  est un module sur l'algèbre définie par le graphe  $\mathcal{A}(G)$ , l'action d' $\mathcal{A}(G)$  sur  $G$  est comme suit :*

$$\begin{aligned} \mathcal{A}(G) \times G &\rightarrow G \\ i.a &= \sum_b \mathcal{F}_{ia}^b b, \end{aligned} \quad (1.11)$$

où les constants de structure  $\mathcal{F}_{ia}^b$  sont des entiers non-négatifs.

Ainsi  $\mathcal{F}_{ia}^b$  représente la multiplicité du vertex  $b$  dans l'action  $i.a$ . Pour que cette action soit un module bien défini, il faut imposer la compatibilité avec l'associativité :

$$(i \cdot j) \cdot a = i \cdot (j \cdot a). \quad (1.12)$$

Utilisant (1.12), (1.9) et (1.11), et du fait que les vertex de  $G$  forment une base de cette espace vectoriel, les coefficients  $\mathcal{F}_{ij}^k$  doivent satisfaire les relations suivantes :

$$\sum_b \mathcal{F}_{ja}^b \mathcal{F}_{ib}^c = \sum_k \mathcal{N}_{ij}^k \mathcal{F}_{ka}^c \quad (1.13)$$

Il est naturel de poser  $0_A \cdot a = a$  et  $1_A \cdot a = \sum_{b:a} b$  (la sommation se fait sur les voisins de  $a$  sur le graphe  $G$ ), alors nous avons  $F_0 = \mathbf{1}$ ,  $F_1 = Ad(G)$  et les autres matrices se obtiennent à partir des rélatios de récurrence (1.8) ou (1.10). L'action explicite de  $\mathcal{A}(G)$  sur  $G$  est définie par ces deux relations, en imposant la compatibilité avec la multiplication dans l'algèbre  $\mathcal{A}(G)$ .

Dans certains cas il est possible définir un produit sur l'espace vectoriel  $G$ , qui soit compatible avec l'action de  $\mathcal{A}(G)$ , de manière à obtenir une algèbre commutative et associative :

$$a.b = \sum_c \mathcal{G}_{ab}^c c, \quad \mathcal{G}_{ab}^c \in \mathbb{N}, \quad (1.14)$$

où les coefficients  $\mathcal{G}_{ab}^c$  sont les constantes de structure de l'algèbre et ils sont vus comme l'analogie de la multiplicité de  $c$  dans la décomposition  $a \cdot b$  (ce sont des entiers non-négatifs). Quand cette structure multiplicative est bien définie nous disons que le graphe  $G$  a **self-fusion**.

Le résultat suivant (concernant les cas ADE) a été premièrement obtenu par Pasquier[62], et les algèbres obtenues sont quelquefois appelées algèbres de Pasquier :

**Propriété 2** *Soit  $G$  un graphe de type ADE à  $d_G$  vertex. Les graphes pour lesquels il est possible de définir un produit satisfaisant les conditions (1.14) sont les graphes  $A_n$ ,  $D_{2n}$ ,  $E_6$  et  $E_8$ .*

**Propriété 3** [23] Pour le système  $SU(3)$  la liste des graphes possédant self-fusion est la suivante : les graphes principaux  $\mathcal{A}_\ell$ , la série infinie de graphes  $\mathcal{D}_n$  pour  $n = 0 \pmod{3}$ , et les trois graphes exceptionnelles  $\mathcal{E}_5, \mathcal{E}_9, \mathcal{E}_{21}$ .

Dans tous les cas (self-fusion o non) nous pouvons construire une table pour de l'action du graphe principal  $\mathcal{A}(G)$  sur  $G$ , de dimension  $d_A \times d_G$ . Cette action est codée par les  $d_A$  matrices  $F_i$  de dimension  $(d_G \times d_G)$  définies comme  $(F_i)_{ab} = \mathcal{F}_{ia}^b$ . De la propriété de structure de module (1.11) plus la compatibilité avec l'associativité (1.12), il est immédiat de trouver que les matrices  $F_i$  satisfont :

$$F_i F_j = \sum_k \mathcal{N}_{ij}^k F_k, \quad (1.15)$$

elles forment donc une représentation de l'algèbre de fusion de dimension  $d_G$  (les matrices  $N_i$  forment une représentation de dimension  $d_A$  de l'algèbre de fusion). Les matrices  $F_i$  satisfont les relations les récurrence (1.8) ou (1.10)(cas  $SU(2)$  ou  $SU(3)$  respectivement) avec identité  $F_0 = \mathbb{1}_{d_G \times d_G}$  et générateur  $F_1 = Ad(G)$ .

### 1.3 La bigèbre de Hopf faible $\mathcal{B}$ associé a un graphe ADE

A tout graphe de Coxeter-Dymkin généralisé est associé un groupoïde quantique (ou algèbre de Hopf faible) que nous appelons  $\mathcal{B}$ . La structure générale de ce groupoïde quantique et les algèbres correspondantes ont été obtenus pour tous les graphes des systèmes  $SU(2)$ ,  $SU(3)$  et même  $SU(4)$  (travaux non publiés d'A. Ocneanu) mais cette structure n'a été totalement explicitée (constants de structure, cellules, etc) que dans les cas  $SU(2)$  pour les diagrammes de type  $A_n$  [28] [20]. Il a été prouvé [57] que toutes ces structures algébriques décrivent également les cas  $SU(N)$  (notamment les diagrammes de Di Francesco-Zuber), bien que cette généralisation soit loin d'être évidente. Le résumé que nous allons présenter ne s'applique, en principe, que au cas  $SU(2)$ , cependant nous incluons des observations permettant la généralisation à un exemple simple du système  $SU(3)$ . Cette présentation ne prétend pas être une exposition de la façon dont on peut associer un groupoïde quantiques à un graphe de Coxeter généralisé, nous effectuons un survol suffisamment cohérent pour permettre de saisir le contexte dans lequel s'insèrent les chapitres 2 et 3 qui représentent finalement le sujet principal de notre travail.

#### 1.3.1 L'espace vectoriel des triangles admissibles.

**Cas  $\mathcal{A}_n$  su système  $SU(2)$ .**

Considérons les représentations irréductibles de  $SU(2)_q$  qui sont étiquetées par les vertex d'un graphe  $A_n$  du système  $SU(2)$ . Un triplet  $\{i, k, j\}$  est dit admissible si la représentation étiquetée par  $i$  apparaît dans la décomposition en somme de représentations irréductibles du produit tensoriel  $j \otimes k$ . Cette définition est naturelle pur les représentations iredcutibles de

$SU(2)$  (étiquetées par les vertex du graphe  $A_\infty$ ), ou pour les représentation irréductibles du graphe du groupe quantique  $SU(2)_q$ , avec  $q$  racine de la unité. Mais la définition de la règle déterminant l'ensemble de triplets admissibles peut être donnée sans connaître la structure de groupe (quantique) sous-jacent, en se servant de la règle booléenne d'admissibilité suivante :

$$(i, k, j) \bmod 2 = 0 \wedge i + k - j \geq 0 \wedge -i + k + j \geq 0 \wedge i - k + j \wedge i + k + j \leq 2\kappa - 4 .$$

Une manière simple de déterminer les triplets admissibles associés à un graphe  $A_n$  peut se faire au travers des matrices de fusion, qu'on peut obtenir facilement à partir de la matrices d'adjacence du graphe, ou de sa table de multiplication. En effet chaque entrée de la table de multiplication du graphe  $A_n$  détermine un ou plusieurs triplets admissibles, le triplet  $\{i, k, j\}$  sera admissible si l'irrep  $j$  apparaît dans le résultat du produit  $i \cdot k$ . Un triplet admissible sera noté par  $\xi_{ij}^k$  ou par des vecteurs  $|i \xrightarrow{k} j\rangle$ , souvent on recourt à la notation représentant ces vecteurs par des triangles ou des vertex a trois arêtes comme suit :

$$\xi_{ij}^k = (i, k, j) = |i \xrightarrow{k} j\rangle = \begin{array}{c} \bullet \\ / \quad \backslash \\ i \quad \quad j \\ \backslash \quad / \\ \bullet \end{array} \begin{array}{c} \xi \\ \hline k \end{array} = \begin{array}{c} i \quad j \\ \backslash \quad / \\ \bullet \quad \xi \\ | \\ k \end{array} \quad (1.16)$$

Nous appellerons **triangles admissibles** les triplets admissibles associés au graphe, c'est à dire dans ce contexte on ne considère pas équivalents deux triangles avec les étiquettes permutées. Toutefois, nous remarquons que dans ce cas des graphes  $A_n$ , les permutations d'un triangle admissible sont des triangles admissibles. La représentation irréductible de l'arête verticale (étiqueté par  $k$ ) est appelé le **longueur** du triangle. Les triangles admissibles engendrent un espace vectoriel

$$H = \bigoplus_{i=0}^{\kappa-1} H_i ,$$

gradué par la longueur des triangles et où chaque sous espace  $H_i \cong \mathbb{C}^{d_i}$  est engendré par les triangles admissibles  $\xi_{ij}^k$  avec  $k$  fixe. La dimension  $d_k$  de chaque sous-espace  $H_k$ , est égale à la somme des entrées de la matrice  $N_i$ . Cette propriété peut être vérifié facilement puisque les matrices  $N_i$  donnent les constantes de structure de l'algèbre de graphe  $A_n$  (voir Propriété 4).

**Exemple : cas  $A_3$  système  $SU(2)_\ell$**  A partir de la table de multiplication (1.7) nous pouvons construire l'espace  $H_{A_3}$  de triangles admissibles de  $A_3$ . La table de multiplication nous donne par exemple :

$$2 \cdot 1 = 1 \implies \begin{array}{c} 2 \quad 1 \\ \backslash \quad / \\ \bullet \\ | \\ 1 \end{array} \quad \text{ou encore} \quad 2 \cdot 2 = 0 \implies \begin{array}{c} 2 \quad 0 \\ \backslash \quad / \\ \bullet \\ | \\ 2 \end{array} .$$

L'espace vectoriel  $H_{A_3}$  est donné par l'ensemble de triangles suivant :

$$\begin{array}{cccc}
 \begin{array}{c} 0 \quad 0 \\ \diagdown \quad / \\ 0 \end{array} & \begin{array}{c} 1 \quad 1 \\ \diagdown \quad / \\ 0 \end{array} & \begin{array}{c} 2 \quad 2 \\ \diagdown \quad / \\ 0 \end{array} & \\
 \begin{array}{c} 1 \quad 2 \\ \diagdown \quad / \\ 1 \end{array} & \begin{array}{c} 2 \quad 1 \\ \diagdown \quad / \\ 1 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \quad 1 \\ \diagdown \quad / \\ 1 \end{array} & \begin{array}{c} 1 \quad 0 \\ \diagdown \quad / \\ 1 \end{array} \\
 \begin{array}{c} 0 \quad 2 \\ \diagdown \quad / \\ 2 \end{array} & \begin{array}{c} 2 \quad 0 \\ \diagdown \quad / \\ 2 \end{array} & \begin{array}{c} 1 \quad 1 \\ \diagdown \quad / \\ 2 \end{array} & .
 \end{array} \tag{1.17}$$

$H_{A_3}$  est un espace vectoriel de dimension 10, avec trois sous-espaces  $H_0$  et  $H_2$  de dimension 3 et  $H_1$  de dimension 4,  $H_{A_3}$  est la somme directe de ces trois sous-espaces.

**Cas  $G$  du système  $SU(2)$ .**

Il y a une généralisation de cette construction quand le diagramme  $A_n$  est remplacé par un diagramme  $ADE$  quelconque  $G$ . Ces diagrammes ne possèdent pas nécessairement la propriété de self-fusion mais, comme nous avons vu le espace vectoriel engendré par les vertex de  $G$  est un module sur le graphe associé  $\mathcal{A}(G)$ . Dans ce cas la table de multiplication  $\mathcal{A}(G) \times \mathcal{A}(G) \rightarrow \mathcal{A}(G)$  est substitué par l'action  $\mathcal{A}(G) \times G \rightarrow G$  de  $\mathcal{A}(G)$  sur  $G$ . A partir de cette table nous allons définir des **triangles admissibles généralisés**  $\xi_{ab}^i$  où deux index ( $a$  et  $b$ ) sont des vertex du graphe  $G$  et la longueur  $i$  est un vertex du graphe principal  $\mathcal{A}(G)$ .

$$\xi_{ab}^i = (a, i, b) = |a \xrightarrow{i} b\rangle = \begin{array}{c} \circ \\ \diagup \quad \diagdown \\ a \quad b \\ \bullet \quad \bullet \\ \xrightarrow{i} \end{array} = \begin{array}{c} a \quad b \\ \diagdown \quad / \\ \bullet \\ \vdots \\ i \end{array} \tag{1.18}$$

Dans ce cas généralisé il peut y avoir des multiplicité dans les triangles admissibles, ceci correspond a de coefficients plus grands que un dans les entrées de la table de l'action de  $\mathcal{A}(G)$  sur  $G$ . Pour simplifier la notation nous omettrons ici l'index de multiplicité, mais il faut le tenir en compte pour le traitement des cas particuliers. Nous remarquons aussi les symétries de ces triangles généralisés, si  $(a, i, b)$  est un triangle admissible, alors le triangle permuté  $(b, i, a)$  est aussi un triangle admissible, cependant, de égale manière que pour le cas  $A_n$ , les triangles avec les étiquettes permutées ne sont considérés égaux.

**Observation pour le cas  $SU(3)$**  Nous notons les triangles admissibles des graphes  $SU(3)$  par le même symbole  $(a, i, c)$ . Dans ce cas la permutation des vertices (même pour les cas  $\mathcal{A}_\ell$ ) ne donne pas des triangles admissibles comme résultat. Dans ce cas la conjugation jue un rôle, si  $(a, i, b)$  est un triangle admissible associé à un graphe  $SU(3)$ , alors les tiangles



$\delta_{ij} \delta_{\xi'\eta} e_{\xi\eta}(i)$ . Ce produit de composition est appelé **produit vertical**, et est représenté par le diagramme suivant :

$$\begin{array}{c} a & b \\ \diagdown & / \\ & \bullet \\ | \\ & \bullet \\ / & \diagdown \\ c & d \end{array} \circ \begin{array}{c} c' & d' \\ \diagdown & / \\ & \bullet \\ | \\ & \bullet \\ / & \diagdown \\ e & f \end{array} = \delta_{c,c'} \delta_{d,d'} \delta_{i,j} \begin{array}{c} a & b \\ \diagdown & / \\ & \bullet \\ | \\ & \bullet \\ / & \diagdown \\ e & f \end{array} . \tag{1.23}$$

Le produit vertical fait de  $(\mathcal{B}, \circ)$  une algèbre semi-simple qui peut être diagonalisée et qui est isomorphe à une somme de blocs matriciels (labellés par  $i$ ) et agissant sur l'espace vectoriel gradué  $H$ .

Considérons maintenant l'espace vectoriel dual  $\widehat{\mathcal{B}}$  engendré par la base duale  $\widehat{e}^I$  et représenté par le diagramme :

$$\widehat{e}^I = \begin{array}{c} \widehat{\phantom{a}} \\ a & b \\ \diagdown & / \\ & \bullet \\ | \\ & \bullet \\ / & \diagdown \\ c & d \end{array} . \tag{1.24}$$

le pairing entre ces deux bases est par définition  $\langle \widehat{e}^J, e_I \rangle = \delta_I^J$ . Le produit  $\circ$  induit un coproduit  $\widehat{\Delta}$  dans  $\widehat{\mathcal{B}}$  défini par l'action sur les éléments de la base duale comme

$$\langle \widehat{\Delta} \widehat{e}^J, e_I \otimes e_K \rangle \equiv \langle \widehat{e}^J, e_I \circ e_K \rangle . \tag{1.25}$$

Nous définissons aussi une deuxième base de l'espace dual  $\widehat{\mathcal{B}}$  noté  $E^J$  et représentée par les diagrammes horizontaux

$$E^J = \begin{array}{c} \circ \\ / & \backslash \\ a & b \\ \backslash & / \\ \bullet & \bullet \\ | & | \\ \bullet & \bullet \\ / & \backslash \\ c & d \\ \circ \end{array} = \begin{array}{c} a & & d \\ \diagdown & & / \\ & \alpha & \beta \\ | & \text{---} x & | \\ & & \\ c & & b \end{array} , \tag{1.26}$$

avec le multi index  $J = (\alpha, \beta, x)$ .  $\widehat{\mathcal{B}}$  est gradé par la longueur horizontale et s'écrit comme somme de blocs des sous espace de longueur fixe  $\widehat{\mathcal{B}}(G) = \bigoplus_x \widehat{\mathcal{B}}_x$ .

La composition des diagrammes horizontaux définit sur  $\widehat{\mathcal{B}}(G)$  un produit associatif  $E^{\alpha\beta}(x) \widehat{\circ} E^{\alpha'\beta'}(y) = \delta_{xy} \delta_{\beta\alpha'} E^{\alpha\beta'}(x)$  appelé **produit horizontal**<sup>4</sup>, et est représenté par

<sup>4</sup>En se servant d'un produit scalaire sur  $\mathcal{B}$ , par exemple celui associé au produit scalaire sur  $H$  défini précédemment, on peut identifier les deux espaces et y faire correspondre au produit vertical sur  $\widehat{\mathcal{B}}$  un produit sur  $\mathcal{B}$  qu'on appelle produit de convolution.

le diagramme suivant :

$$\begin{array}{c} a \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ c \end{array} \begin{array}{c} x \\ \text{---} \\ \bullet \\ \text{---} \\ \end{array} \begin{array}{c} b \\ \diagup \\ \bullet \\ \diagdown \\ d \end{array} \widehat{\circ} \begin{array}{c} b' \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ d' \end{array} \begin{array}{c} y \\ \text{---} \\ \bullet \\ \text{---} \\ \end{array} \begin{array}{c} e \\ \diagup \\ \bullet \\ \diagdown \\ f \end{array} = \delta_{bb'} \delta_{dd'} \delta_{xy} \begin{array}{c} a \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ c \end{array} \begin{array}{c} x \\ \text{---} \\ \bullet \\ \text{---} \\ \end{array} \begin{array}{c} e \\ \diagup \\ \bullet \\ \diagdown \\ f \end{array} \quad (1.27)$$

Ce produit fait de  $(\widehat{\mathcal{B}}, \widehat{\circ})$  une algèbre semi-simple isomorphe à une somme de blocs matriciels labellés par un index  $x$  et agissant sur l'espace vectoriel gradué  $V = \bigoplus_x V_x$ . Les matrices élémentaires (unités matricielles) de chaque bloc  $x$  sont les élément de la base  $E^I$ .

Le changement de base entre la base dual  $\hat{e}^I$  et la base des diagrammes horizontaux  $E^J$  en  $\widehat{\mathcal{B}}(G)$  est définie par un ensemble de coefficients  $F_2$  appelés **Cellules d'Ocneanu** :

$$\begin{array}{c} a \quad b \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \\ \text{---} \\ i \\ \text{---} \\ \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ c \quad d \end{array} = \sum_x F_2 \{ \begin{array}{c} a \quad b \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \\ \text{---} \\ x \\ \text{---} \\ \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ c \quad d \end{array} \}$$

Le pairing entre les deux bases est donne par définition par  $\langle \hat{e}^I, \hat{E}_J \rangle = F_2^I{}_J$ . La definition de la base  $E^J$ , et donc de l'algèbre  $\widehat{\mathcal{B}}$  est équivalente à la donnée des coefficients  $F_2$  qui sera donne plus loin.

Le produit associatif  $\widehat{\circ}$  induit dans  $\mathcal{B}$  un coproduit  $\Delta$  coassociatif, faisant de  $(\mathcal{B}, \Delta)$  une cogèbre, les deux structures dans  $\mathcal{B}$  sont compatibles, c'est-à-dire entre autre que  $\Delta$  est un homomorphisme  $(\mathcal{B}, \circ) \mapsto (\mathcal{B} \otimes \mathcal{B}, \circ)$  :

$$\Delta(u \circ v) = \Delta(u) \circ \Delta(v), \quad u, v \in \mathcal{B}. \quad (1.28)$$

Cette compatibilité n'est pas ni évidente ni automatique, et résulte des propriétés particulières des coefficients  $F_2$  que nous allons enoncer plus bas. Ces conditions de compatibilité sont prises dans le sens "faible", c'est à dire  $\Delta(\mathbf{1}) \neq \mathbf{1} \otimes \mathbf{1}$  mais  $\Delta(\mathbf{1}) = \mathbf{1}_t \otimes \mathbf{1}_s$  ou nous sous entendons une sommation das le membre de droite. La definition d'un coproduit compatible avec la multiplication dans  $\widehat{\mathcal{B}}$  est en fait l'un des difficultés majeures de la construction explicite de la bigèbre.

Le coproduit  $\Delta$  dans  $\mathcal{B}$  est codé par un ensemble de coefficients appelés  $F_1$  :

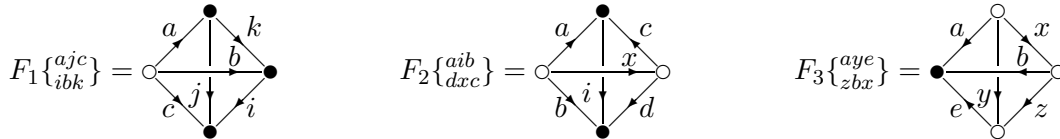
$$\Delta \begin{array}{c} a \quad b \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \\ \text{---} \\ i \\ \text{---} \\ \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ c \quad d \end{array} = \sum_{j,k;e,f} F_1 \{ \begin{array}{c} a \quad b \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \\ \text{---} \\ i \\ \text{---} \\ \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ c \quad d \end{array} \} \overline{F_1 \{ \begin{array}{c} c \quad d \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \\ \text{---} \\ j \\ \text{---} \\ \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ e \quad f \end{array} \}} \otimes \begin{array}{c} a \quad e \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \\ \text{---} \\ j \\ \text{---} \\ \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ c \quad f \end{array} \otimes \begin{array}{c} e \quad b \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \\ \text{---} \\ k \\ \text{---} \\ \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ f \quad d \end{array} \quad (1.29)$$

Le coproduit  $\widehat{\Delta}$  dans  $\widehat{\mathcal{B}}$  est codé par un ensemble de coefficients appelés  $F_3$  :

$$\widehat{\Delta} \begin{array}{c} a \\ \swarrow \\ \bullet \\ \searrow \\ c \end{array} \begin{array}{c} x \\ \text{---} \\ \bullet \\ \text{---} \\ d \end{array} \begin{array}{c} b \\ \swarrow \\ \bullet \\ \searrow \\ d \end{array} = \sum_{y,z;e,f} F_3\{aye\} \overline{F_3\{zbx\}} \begin{array}{c} a \\ \swarrow \\ \bullet \\ \searrow \\ c \end{array} \begin{array}{c} y \\ \text{---} \\ \bullet \\ \text{---} \\ f \end{array} \begin{array}{c} e \\ \swarrow \\ \bullet \\ \searrow \\ f \end{array} \otimes \begin{array}{c} e \\ \swarrow \\ \bullet \\ \searrow \\ f \end{array} \begin{array}{c} z \\ \text{---} \\ \bullet \\ \text{---} \\ d \end{array} \begin{array}{c} b \\ \swarrow \\ \bullet \\ \searrow \\ d \end{array} . \quad (1.30)$$

La compatibilité avec les produits  $\circ$  et  $\widehat{\circ}$  impose sur l'ensemble de ces coefficients  $\{F_1, F_2, F_3\}$  des conditions pour faire de  $\mathcal{B}$  (et de son dual  $\widehat{\mathcal{B}}$ ) une bigèbre de Hopf faible. Ces conditions sont décrites par un ensemble d'équations connu sous le nom de "The Big Pentagon Equation".

**Équations pentagonales** Utilisant la représentation diagrammatique des éléments de la base de  $\mathcal{B}$  et de  $\widehat{\mathcal{B}}$  en termes de triangles duaux, nous pouvons illustrer les coefficients  $F_1, F_2$  et  $F_3$  comme des tétraèdres :



La condition de coassociativité du coproduit  $\Delta$  est vérifiée s'il existe une fonction  $F_0$ , illustrée par un tétraèdre sans vertex  $\circ$  telle que l'équation de type pentagonale suivante soit satisfaite :

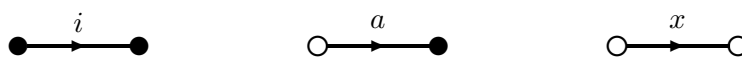
$$F_0 F_1 F_1 = F_1 F_1 \quad (P_1)$$

Pour que  $F_0$  satisfasse  $(P_1)$  il est aussi nécessaire que  $F_0$  satisfasse une équation pentagonale du type  $F_0 F_0 F_0 = F_0 F_0$ , notée  $(P_0)$ . De manière duale, l'associativité du coproduit dans  $\widehat{\mathcal{B}}$  impose l'existence d'une fonction  $F_4$  illustrée par un tétraèdre sans vertex  $\bullet$ , telle qu'elle satisfasse l'équation pentagonale du type  $F_4 F_3 F_3 = F_3 F_3$ , notée  $(P_4)$ ; de même  $F_4$  doit satisfaire une équation du type  $F_4 F_4 F_4 = F_4 F_4$ , notée  $(P_5)$ . Les deux fonctions  $F_0$  et  $F_4$  sont illustrées par :



Enfin, la condition pour que le *pairing* transpose le coproduit de  $\mathcal{B}$  en le produit de  $\widehat{\mathcal{B}}$  est aussi une équation pentagonale de type  $F_2 F_1 F_1 = F_2 F_2$   $(P_2)$ . De manière duale, la transposition du produit de  $\mathcal{B}$  en le produit de  $\widehat{\mathcal{B}}$  implique  $F_2 F_3 F_3 = F_2 F_2$   $(P_3)$ .

**Remarque 1** Dans ce contexte la nature des indices  $\{i, j, k, \dots\}$ ;  $\{a, b, c, \dots\}$ ;  $\{x, y, z, \dots\}$ . correspond respectivement à trois types d'arcs orientés :



Insistons sur le fait qu'il n'y a pas d'arc reliant  $\bullet$  à  $\circ$ . Alors la notation  $\{\dots\}$  à elle seule suffit sans qu'il soit nécessaire de préciser s'il s'agit de  $F_0, F_1, F_2, F_3$  ou  $F_4$ .

Pour les graphes du système  $SU(2)$  les différents coefficients  $F$  apparaissent comme des généralisations des symboles de Racah, [20],[28]. Pour le système  $SU(3)$  l'orientation des arêtes des graphes font que cette identification demande une généralisation.

La connaissance d'un ensemble  $F = (F_0, F_1, F_2, F_3, F_4)$  vérifiant "The Big Pentagon Equation"  $(P) = (P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5)$  permet alors de construire toutes les structures d'une bigèbre de Hopf faible [13]. Toutefois, la résolution explicite de toutes les équations et la détermination des différents coefficients pose des problèmes techniques extrêmement complexes.

### 1.3.3 Projecteurs minimaux centraux, unités et counités

Soit  $\mathcal{B}$  l'espace vectoriel des doubles triangles associé au graphe  $G$ , et  $\widehat{\mathcal{B}}$  son dual.  $(\mathcal{B}, \circ)$  et  $(\widehat{\mathcal{B}}, \hat{\circ})$  sont des algèbres semi-simples et isomorphes à une somme de blocs matricielles labellés par  $i$  et  $x$  respectivement. Dans  $\mathcal{B}$  nous dénotons  $\pi_i$  le projecteur de dimension  $d_i \times d_i$  du bloc  $i$ , et dans  $\widehat{\mathcal{B}}$  nous dénotons  $\varpi_x$  le projecteur de dimension  $d_x \times d_x$  du blocs  $x$ . Les bases  $e_I$  et  $E^J$  sont les matrices élémentaires des produits respectives, ceci nous amène à définir les projecteurs suivantes :

$$\pi_i = \sum_{a,b} \begin{array}{c} a \quad b \\ \diagdown \quad / \\ \bullet \\ | \\ \bullet \\ / \quad \diagdown \\ a \quad b \end{array} \quad \text{et} \quad \varpi_x = \sum_{a,b} \begin{array}{c} a \quad \quad \quad a \\ \diagdown \quad \quad \quad / \\ \bullet \quad \quad \quad \bullet \\ | \quad \quad \quad | \\ \bullet \quad \quad \quad \bullet \\ / \quad \quad \quad \diagdown \\ b \quad \quad \quad b \end{array} \quad (1.31)$$

où la sommation est effectuée sur tous les triangles admissibles  $(a, n, b)$  ou  $(a, x, b)$ . Nous pouvons vérifier que ces opérateurs sont bien des projecteurs minimaux centraux puisque a partir des définitions des produits de vertical et horizontal (1.23) et (1.27) il est immédiat que

$$\pi_i \circ \pi_j = \delta_{i,j} \quad \varpi_x \hat{\circ} \varpi_y = \delta_{x,y}$$

L'unité dans  $\mathcal{B}$  peut-être obtenue immédiatement à partir de cette construction puisque  $\mathcal{B}$  est explicitement isomorphe à une somme de blocs matricielles de dimension  $d_i \times d_i$ , alors nous avons :

$$\mathbf{1} = \sum_i \pi_i \quad (1.32)$$

A partir de cette définition, et en utilisant la équation (1.31) l'action du coproduit  $\Delta$  sur

$$\text{l'identité est } \Delta \mathbf{1} = \sum_c t_c \otimes s_c = \mathbf{1}_t \otimes \mathbf{1}_s, \text{ avec } t_c = \sum_{i,a} \begin{array}{c} a \quad c \\ \diagdown \quad / \\ \bullet \\ | \\ \bullet \\ / \quad \diagdown \\ a \quad c \end{array} \quad \text{et} \quad s_c = \sum_{i,b} \begin{array}{c} c \quad b \\ \diagdown \quad / \\ \bullet \\ | \\ \bullet \\ / \quad \diagdown \\ c \quad b \end{array} .$$

Les vecteurs  $\{t_c\}$  et  $\{s_c\}$  engendrent respectivement les sous espaces *target*  $\mathcal{B}_t$  et *source*  $\mathcal{B}_s$ , son existence vient de la théorie générale des algèbres de Hopf faibles [14], mais la réalisation

que nous avons présentée est spécifique à exemples associés aux graphes  $ADE$  (c'est a dire  $SU(2)$ )[20]. Elle marche aussi pour l'exemple

De la même manière l'unité dans  $\widehat{\mathcal{B}}$  est obtenue comme

$$\mathbf{1} = \sum_x \varpi_x, \quad (1.33)$$

puisque  $\widehat{\mathcal{B}}$  est isomorphe a une somme de blocs matricielles de dimension  $d_x \times d_x$ .

La définition de l'unité en  $\widehat{\mathcal{B}}$  nous permet de définir la counité  $\epsilon$  dans  $\mathcal{B}$ . Dans le cas des algèbres de Hopf la counité et le coproduit sont des homomorphismes, mais pour les groupoïdes quantiques à cause de l'action du coproduit sur l'unité, la condition d'homomorphisme concernant la counité est affaiblie de la façon suivante :

$$\epsilon(\xi \circ \xi') = \epsilon(\xi \mathbf{1}_t) \epsilon(\xi' \mathbf{1}_s).$$

Explicitement l'action sur les éléments de la base est comme suit :

$$\epsilon(e_I \circ e_J) = \sum_c \epsilon(e_I \circ t_c) \epsilon(e_J \circ s_c), \quad (1.34)$$

et est définie comme l'application  $\epsilon : \mathcal{B} \rightarrow \mathbb{C}$  envoyant les doubles triangles de longueur  $i = 0$  a 1 et tous les autres a 0. De manière analogue on peut définir une counité  $\hat{\epsilon}$  sur  $\widehat{\mathcal{B}}$  dans le sens faible. C'est un'application lineaire à valeurs complexes égale à 1 si  $x = 0$  et égale à 0 si non.

Il existe aussi une antipode  $S$  dans  $\mathcal{B}$  (et  $\widehat{S}$  dans  $\widehat{\mathcal{B}}$ ), faisant de  $\mathcal{B}$  (et  $\widehat{\mathcal{B}}$ ) une algèbre de Hopf faible ou **groupoïde quantique**. Mais nous n'allons pas approfondir cet aspect d'avantage, le seul commentaire est que dans ce cas aussi les axiomes d'une algèbre de Hopf usuelle sont alors modifiés car ils contiennent les éléments apparaissant dans  $\mathbf{1}_s$  et  $\mathbf{1}_t$ .

### 1.3.4 Algèbres de caractères pour $\mathcal{B}$ et $\widehat{\mathcal{B}}$

Les caracteres pour l'algèbre semisimples  $(\mathcal{B}, \circ)$  sont les éléments  $\tilde{\pi}_i; \in \widehat{\mathcal{B}}$  definies comme

$$\langle \tilde{\pi}_i, \xi \eta \rangle = Tr(\pi_i \circ \xi \eta). \quad (1.35)$$

Les caracteres  $\tilde{\pi}_i$  sont des éléments de l'agèbre  $(\widehat{\mathcal{B}}, \hat{\circ})$  et génèrent une sous algèbre isomophe à l'algèbre  $\mathcal{A}(G)$  du graphe associé à  $G$ . Le produit est alors donné par

$$\tilde{\pi}_i \hat{\circ} \tilde{\pi}_j = \mathcal{N}_{i,j}^k \tilde{\pi}_k$$

où les constantes de structure  $\mathcal{N}_{i,j}^k$  sont celles de l'équation 1.4.

De la même manière, les caractères de l'algèbre semisimple  $(\widehat{\mathcal{B}}, \hat{\circ})$  sont les éléments  $\tilde{\varpi}_x; \in \mathcal{B}$  définis comme

$$\langle \hat{\xi} \eta, \tilde{\varpi}_x \rangle = Tr(\hat{\xi} \eta \hat{\circ} \tilde{\varpi}_x). \quad (1.36)$$

Les caractères  $\tilde{\omega}_x$  sont des éléments de l'algèbre  $(\mathcal{B}, \circ)$  et engendrent une sous algèbre isomorphe à une algèbre de graphe appelé **algèbre des symétries quantiques** et dénotée  $Oc(G)$ . L'algèbre de caractères  $Oc(G)$  est en général non commutative et a en général deux générateurs, le graphe  $Oc(G)$  est composé de deux graphes superposés ayant le même ensemble de vertex, chacun d'entre eux décrivant le graphe de Cayley de la multiplication par le générateur correspondant. Le graphe  $\mathcal{A}(G)$  est spécial en ce sens qu'un seul générateur suffit.

### 1.3.5 Cellules d'Ocneanu

Les systèmes de cellules ont été introduits par Ocneanu dans le contexte de paragroupes et des inclusions de sous-facteurs [55][57] (voir aussi [20]). Ces cellules ont par la suite été reliés à des modèles intégrables définis sur le réseau (analogie avec les poids de Boltzmann [65]).

Considérons un graphe de Dynkin  $G$ , ses vertex notés  $\{a, b, c, \dots\}$  et soit  $\mu_a$  la composante de Perron-Frobenius de  $a$  (dimension quantique). Soient  $\xi = (a, i, b), \eta = (d, i, c), \alpha = (a, x, d), \beta = (b, x, c)$  des triangles admissibles sur  $G$ . Une cellule d'Ocneanu est un carré dont les arrêtes horizontales sont labellées par des triangles  $\xi, \eta$  de la même longueur  $i$ , et les arrêtes verticales sont labellés par des triangles  $\alpha, \beta$  de longueur  $x$ , tels que :  $s(\xi) = s(\alpha) = a; r(\xi) = s(\beta) = b; r(\alpha) = s(\eta) = d; r(\eta) = r(\beta) = c$ . Ces cellules sont représentés par les diagrammes suivantes :

$$\begin{array}{ccc} \begin{array}{c} a \quad \xi \quad b \\ \alpha \downarrow \quad \downarrow \beta \\ d \quad \eta \quad c \end{array} & \text{ou aussi,} & \begin{array}{c} a \quad i \quad b \\ \downarrow \quad \downarrow x \\ d \quad c \end{array} \end{array} \quad (1.37)$$

Une cellule sera dite **basique** si les triangles qui la composent sont tous de longueur un. Une **connexion**  $x$  est une application qui assigne à chaque cellule d'Ocneanu un nombre complexe, et qui doit vérifier certaines conditions rappelées plus loin. Ce nombre complexe coïncide avec la fonction pentagonale  $F_2$  lorsque  $\xi, \eta$  sont des triangles de longueur  $i$  et  $\alpha, \beta$  des triangles verticaux de longueur horizontal  $x$ , et sera noté :

$$F_2\{\begin{array}{c} a \quad \xi \quad b \\ \alpha \downarrow \quad \downarrow \beta \\ d \quad \eta \quad c \end{array}\} = \begin{array}{c} a \quad i \quad b \\ \downarrow \quad \downarrow x \\ d \quad c \end{array} \quad (1.38)$$

Pour  $A_n SU(2)$  les coefficients  $F_0, F_1, F_2, F_2, F_3, F_4$  sont égaux parce que tous les index sont codés par le graphe  $A_n$  et sont équivalents à les symboles de Racah (voir [20]). Dans ce cas nous écrivons simplement

$$\{\begin{array}{c} i \quad n \quad j \\ \downarrow \quad \downarrow m \\ l \quad k \end{array}\} = \begin{array}{c} i \quad n \quad j \\ \downarrow \quad \downarrow m \\ l \quad k \end{array} \quad , \quad (1.39)$$

où nous avons les triangles admissibles  $(i, n, j), (k, n, l), (i, m, l)$  et  $(k, m, j)$ . Nous remarquons que cette identification implique que les cellules ont les symétries du quadrilatère, c'est à dire

que nous avons les identifications :

$$\{i n j\}_{k m l} = \{n k l\}_{m i j} = \{k m j\}_{i n l} = \{m i l\}_{n k j} = \{n i j\}_{m k l} = \{i m l\}_{k n j} = \{m k j\}_{n i l} = \{k n l\}_{i m l}$$

ces propriétés de symétrie ne sont pas satisfaites dans le cas  $SU(3)$  comme nous le verrons.

Pour faciliter la lecture, nous n'allons pas écrire explicitement tous les indices. Elles doivent satisfaire les conditions suivantes [20], [55] :

$$\begin{aligned} \begin{array}{c} a & b \\ \downarrow & \downarrow \\ \square & \\ \downarrow & \downarrow \\ d & c \end{array} &= \sqrt{\frac{[b][d]}{[a][c]}} \begin{array}{c} \overline{d} & \overline{c} \\ \downarrow & \downarrow \\ \square & \\ \downarrow & \downarrow \\ a & b \end{array} && \text{réflexion horizontale} && (A_1) \\ \begin{array}{c} a & b \\ \downarrow & \downarrow \\ \square & \\ \downarrow & \downarrow \\ d & c \end{array} &= \sqrt{\frac{[b][d]}{[a][c]}} \begin{array}{c} b & \overline{a} \\ \downarrow & \downarrow \\ \square & \\ \downarrow & \downarrow \\ d & c \end{array} && \text{réflexion verticale} && (A_2) \\ \sum_b \begin{array}{c} a & b \\ \downarrow & \downarrow \\ \square & \\ \downarrow & \downarrow \\ d & c \end{array} &= \delta_{d,d'} \begin{array}{c} a & b \\ \downarrow & \downarrow \\ \square & \\ \downarrow & \downarrow \\ d & c \end{array} && \text{unitarité} && (A_3) \end{aligned}$$

où  $\overline{\square}$  est le complexe conjugué de  $\square$  et  $[v_i]$  est la  $q$ -dimension du vertex  $v_i$ . Les conditions précédentes impliquent aussi :

$$\begin{aligned} \begin{array}{c} a & b \\ \downarrow & \downarrow \\ \square & \\ \downarrow & \downarrow \\ d & c \end{array} &= \begin{array}{c} c & d \\ \downarrow & \downarrow \\ \square & \\ \downarrow & \downarrow \\ b & a \end{array} && \text{réflexion diagonale} && (A_4) \\ \sum_d \begin{array}{c} a & b \\ \downarrow & \downarrow \\ \square & \\ \downarrow & \downarrow \\ d & c \end{array} &= \delta_{b,b'} \begin{array}{c} a & \overline{b'} \\ \downarrow & \downarrow \\ \square & \\ \downarrow & \downarrow \\ d & c \end{array} && \text{unitarité} && (A_5) \\ \sum_c \begin{array}{c} a & b \\ \downarrow & \downarrow \\ \square & \\ \downarrow & \downarrow \\ d & c \end{array} &= \sqrt{\frac{[b][d]}{[a][c]}} \delta_{a,a'} \begin{array}{c} a' & b \\ \downarrow & \downarrow \\ \square & \\ \downarrow & \downarrow \\ d & c \end{array} && \text{unitarité} && (A_6) \\ \sum_a \begin{array}{c} a & b \\ \downarrow & \downarrow \\ \square & \\ \downarrow & \downarrow \\ d & c \end{array} &= \sqrt{\frac{[b][d]}{[a][c]}} \delta_{c,c'} \begin{array}{c} a & \overline{b} \\ \downarrow & \downarrow \\ \square & \\ \downarrow & \downarrow \\ d & c' \end{array} && \text{unitarité} && (A_7) \end{aligned}$$

Pour un système de cellules, les conditions d'unitarité et de réflexions fixent les valeurs possibles des connexions, à une liberté de choix de jauge près. Si  $X(a, b, c, d)$  est la valeur d'une cellule – pour une connexion  $x$  donnée – satisfaisant les propriétés  $(A_1, A_2, A_3)$ , alors

$$X'(a, b, c, d) = U(a, d)^* U(d, c)^* X(a, b, c, d) U(a, b) U(b, c), \tag{1.40}$$

avec  $U(a, b)^* = U(b, a)$ , satisfait aussi ces propriétés [65]. À un choix de jauge près, pour un système de cellules basiques, il existe deux solutions complexes conjuguées l'une de l'autre. Une formule générale pour ces cellules basiques est donnée dans [56] et [20] pour le cas  $A_n$ . Dans [20] l'identification des cellules de  $A_n$  avec les symbols de Racah est faite explicitement.

La valeur d'une connexion pour des cellules générales s'obtient à partir des valeurs des cellules basiques. Il est plus instructif de présenter un exemple. Considérons une cellule où les chemins horizontaux sont de longueur 3 et les chemins verticaux de longueur 2. On montre que la valeur de la connexion de cette cellule peut s'obtenir à partir de la somme sur toutes les configurations permises pour les vertex intérieurs de la valeur de la connexion de la cellule "remplie", où la valeur d'une connexion pour une cellule "remplie" est donnée par le produit de toutes les cellules basiques qui la composent.

$$\begin{array}{c} a & b & c & d \\ \hline \downarrow & \rightarrow & \rightarrow & \downarrow \\ w & & & w' \\ \hline u_1 & u_2 & u_3 & u_4 \end{array} = \sum_{t_1} \sum_{t_2} \begin{array}{c} a & b & c & d \\ \hline \downarrow & \rightarrow & \rightarrow & \downarrow \\ w & t_1 & t_2 & w' \\ \hline u_1 & u_2 & u_3 & u_4 \end{array} \quad (1.41)$$

Nous allons voir que cette propriété des connexions nous permet d'obtenir l'ensemble complet des cellules de l'exemple  $A_2 SU(2)$  (mais aussi pour le cas  $A_1 SU(3)$ ) à partir de la valeur de la connexion des cellules basiques.

## 1.4 Le graphe d'Ocneau $Oc(G)$

### 1.4.1 Définition

La diagonalisation de  $\widehat{\mathcal{B}}$  pour la loi  $\hat{o}$  donne lieu à des projecteurs minimaux centraux  $\varpi_x$  qui, au travers du pairing définie par l'équation (1.36), permet de définir les caractères irréductibles dont la multiplication par la loi  $\circ$  est codée par le graphe d'Ocneau de  $G$ .

### Algèbre du graphe $Oc(G)$

Les vertex de ces graphes sont notés  $(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}, \dots)$  et nous appelons  $d_O$  le nombre de vertex du graphe. Considérons l'espace vectoriel de dimension  $d_O$  formé par les vertex du graphe  $Oc(G)$ . Les éléments  $\underline{1}$  et  $\underline{1}'$  sont appelés respectivement les générateurs chiraux gauche et droit.

Le graphe d'Ocneau est la superposition de deux graphes de Cayley de multiplication par les générateurs. La multiplication par le générateur gauche  $\underline{1}$  (resp. droit  $\underline{1}'$ ) est donnée par la somme des voisins reliés par une ligne bleue (resp. rouge). De plus, l'élément  $\underline{0}$  est considéré comme l'identité pour cette multiplication. Nous avons donc :

$$\underline{0} \cdot \underline{x} = \underline{x}, \quad \underline{1} \cdot \underline{x} = \sum_{\underline{y} \sim \underline{1}} \underline{y} = \sum_y (O_{\underline{1}})_{xy} \underline{y}, \quad \underline{1}' \cdot \underline{x} = \sum_{\underline{y} \sim \underline{1}'} \underline{y} = \sum_y (O_{\underline{1}'})_{xy} \underline{y}. \quad (1.42)$$

où  $O_{\underline{1}}$  et  $O_{\underline{1}'}$  sont les matrices d'adjacence correspondantes aux générateurs  $\underline{1}$  et  $\underline{1}'$ . À partir de ces données et en imposant l'associativité, il est possible d'étendre la multiplication à tous les vertex de  $Oc(G)$ . Nous obtenons alors l'algèbre de graphe  $Oc(G)$ , qui sera aussi notée  $Oc(G)$  et dont la multiplication est donnée par :

$$\underline{x} \cdot \underline{y} = \sum_z \mathcal{O}_{xy}^z \underline{z} \quad (1.43)$$

où  $\mathcal{O}_{xy}^z \in \{0, 1, \dots\}$  est vu comme la multiplicité de  $\underline{z}$  dans  $\underline{x} \cdot \underline{y}$ . Cette algèbre est appelée l'**algèbre des symétries quantiques** de  $G$ . Contrairement aux algèbres de graphes  $G$ , les algèbres  $Oc(G)$  ne sont pas forcément commutatives.

À chaque vertex  $\underline{x}$  du graphe  $Oc(G)$  nous associons la matrice  $(d_O \times d_O)$   $O_x$  telle que  $(O_x)_{zy} = \mathcal{O}_{xy}^z$ . Nous avons notamment  $O_0 = \mathbf{1}_{s \times s}$  l'identité de l'algèbre et  $O_{\underline{1}}$ ,  $O_{\underline{1}'}$  les deux générateurs. De la même manière que pour les matrices  $N_i$  et  $F_i$ , la compatibilité avec le produit (1.43) impose que les matrices  $O_x$  donnent une représentation fidèle de l'algèbre  $Oc(G)$  :

$$O_x O_y = \sum_z \mathcal{O}_{xy}^z O_z = \sum_z (O_x)_{zy} O_z. \quad (1.44)$$

#### 1.4.2 $G$ comme module sur $Oc(G)$ : matrices $S_x$

Les graphes d'Ocneanu définissent une algèbre de graphe  $Oc(G)$ . Nous voulons définir une action de  $Oc(G)$  sur l'espace vectoriel  $G$  :

$$\begin{aligned} Oc(G) \times G &\rightarrow G \\ \underline{x} \cdot a &= \sum_b \mathcal{S}_{xa}^b b \end{aligned} \quad (1.45)$$

telle que les coefficients  $\mathcal{S}_{xa}^b$  soient des entiers non-négatifs (ainsi  $\mathcal{S}_{xa}^b$  représente la multiplicité de  $b$  dans  $\underline{x} \cdot a$ ). Pour que cette action soit bien définie, il faut imposer :

$$(\underline{x} \cdot \underline{y}) \cdot a = \underline{x} \cdot (\underline{y} \cdot a) \quad (1.46)$$

Utilisant (1.43) et (1.45), et du fait que les vertex de  $G$  sont des éléments linéairement indépendants de l'espace vectoriel, les coefficients  $\mathcal{S}_{xa}^b$  doivent satisfaire les relations suivantes :

$$\sum_b \mathcal{S}_{xa}^b \mathcal{S}_{yb}^c = \sum_z \mathcal{O}_{xy}^z \mathcal{S}_{za}^c \quad (1.47)$$

Les indices  $(a, b, c, \dots)$  sont réservés pour les vertex de  $G$  ( $a, b, c = 0, 1, \dots, d_G - 1$ ), et les indices  $(x, y, z, \dots)$  sont réservés pour les  $s$  vertex de  $Oc(G)$ . Du fait que  $\underline{1}$  et  $\underline{1}'$  sont les générateurs de l'algèbre  $Oc(G)$  (l'unité  $\underline{0}$  peut aussi s'exprimer à l'aide de  $\underline{1}$  et  $\underline{1}'$ ), tout élément  $\underline{x}$  de  $Oc(G)$  s'exprime comme un polynôme sur  $(\underline{0}, \underline{1}, \underline{1}')$  :

$$\underline{x} = Pol_x(\underline{0}, \underline{1}, \underline{1}')$$

Il est donc suffisant de définir l'action de  $Oc(G)$  par ses générateurs. L'action explicite de  $Oc(G)$  sur  $G$  est définie par :

$$\left. \begin{aligned} Oc(G) \times G &\rightarrow G \\ \underline{0}.a &= a \\ (\underline{1})^n.a = (\underline{1}')^n.a &= (1)^n.a \\ (\underline{1}.\underline{1}')^n.a &= (1.1)^n.a \end{aligned} \right\} \quad (1.48)$$

À noter que même pour les cas où  $G$  ne possède pas *self-fusion*, l'action est bien définie : la multiplication  $1.a$  existe toujours (codée par le graphe  $G$ , c'est à dire par l'action du générateur du graphe  $\mathcal{A}(G)$ ). L'action d'un élément quelconque  $\underline{x}$  de  $Oc(G)$  sur  $G$  s'écrit :

$$\underline{x}.a = Pol_x(\underline{0}, \underline{1}, \underline{1}').a = Pol_x(0, 1, 1).a \quad (1.49)$$

### Matrices $S_x$

Introduisons  $d_O$  matrices  $(d_G \times d_G)$   $S_x$  telles que  $(S_x)_{ab} = S_{xb}^a$ . Par la propriété de module de (1.46), les matrices  $S_x$  satisfont les relations suivantes :

$$S_x.S_y = \sum_z \mathcal{O}_{xy}^z S_z \quad (1.50)$$

Par la définition explicite (1.48) de l'action de  $Oc(G)$  sur  $G$ , nous avons :  $S_0 = \mathbf{1}$ ,  $S_1 = S_{1'} = Ad_G$ . Les autres matrices  $S_x$  peuvent être obtenues à partir de la connaissance de la réalisation de  $Oc(G)$ .

## 1.5 Relations entre $\mathcal{A}(G)$ et $Oc(G)$

### 1.5.1 Fonctions de partition

Considérons des théories conformes à deux dimensions avec algèbre affine  $\widehat{su}(2)$ . Les fonctions de partition d'un système avec deux lignes de défauts  $x$  et  $y$  – appelées généralisées [63] – définies sur le tore (de paramètre modulaire  $\tau$ ) s'écrivent :

$$\mathcal{Z}_{x|y}(\tau) = \sum_{i,j} \chi_i(\tau) \widetilde{\mathcal{W}}_{xy}^{ij} \bar{\chi}_j(\tau), \quad (1.51)$$

où les  $\chi_i(\tau)$  sont les caractères de l'algèbre  $\widehat{su}(2)$ , et les coefficients  $\widetilde{\mathcal{W}}_{xy}^{ij}$  sont des entiers non-négatifs. Le cas sans ligne de défauts ( $x=y=0$ ) permet d'obtenir l'invariant modulaire  $\mathcal{M}$  qui commute avec les générateurs  $S$  et  $T$  du groupe modulaire ( $\mathcal{M}_{ij} = \widetilde{\mathcal{W}}_{00}^{ij}$ ), et la fonction de partition invariante modulaire s'écrit :

$$\mathcal{Z}(\tau) = \bar{\chi} \mathcal{M} \chi \quad (1.52)$$

Définissant les matrices  $(d_O \times d_O) \tilde{V}_{ij}$  telles que  $(\tilde{V}_{ij})_{xy} = \tilde{\mathcal{W}}_{xy}^{ij}$ , des conditions de compatibilité [63],[64] imposent que ces matrices doivent satisfaire l'algèbre carrée de fusion :

$$\tilde{V}_{ij} \tilde{V}_{i'j'} = \sum_{i'',j''} \mathcal{N}_{ii''}^{i''} \mathcal{N}_{jj''}^{j''} \tilde{V}_{i''j''}, \quad (1.53)$$

alors que les matrices  $\tilde{V}_{i1}$  et  $\tilde{V}_{1j}$  forment une représentation de l'algèbre de fusion :

$$\tilde{V}_{i1} \tilde{V}_{i'1} = \sum_{i''} \mathcal{N}_{ii''}^{i''} \tilde{V}_{i''1}, \quad \tilde{V}_{1j} \tilde{V}_{1j'} = \sum_{j''} \mathcal{N}_{jj''}^{j''} \tilde{V}_{1j''}. \quad (1.54)$$

La matrice  $\tilde{V}_{11}$  est l'identité, tandis que les matrices  $\tilde{V}_{21}$  et  $\tilde{V}_{12}$  correspondent respectivement aux deux matrices d'adjacence d'un graphe d'Ocneanu  $Oc(G)$  :

$$\tilde{V}_{11} = \mathbf{1}_{d_O \times d_O}, \quad \tilde{V}_{21} = O_1, \quad \tilde{V}_{12} = O_{1'}. \quad (1.55)$$

Ainsi la donnée du graphe d'Ocneanu (des matrices  $O_1$  et  $O_{1'}$ ) permet d'obtenir les matrices  $\tilde{V}_{21}$  et  $\tilde{V}_{12}$ , et en utilisant (1.54) puis (1.53) d'obtenir les matrices  $\tilde{V}_{ij}$ , et donc les coefficients  $\tilde{\mathcal{W}}_{xy}^{ij}$  qui définissent les fonctions de partition généralisées.

### 1.5.2 $Oc(G)$ comme bi-module sur $\mathcal{A}(G)$ : matrices $W_{ij}$ et $W_{xy}$

Soit  $G$  un graphe de type  $ADE$  (ou généralisé) et  $\mathcal{A}(G)$  l'algèbre du graphe  $A_n$  de même nombre de Coxeter. On montre dans tous les cas qu'une action à gauche et à droite de  $\mathcal{A}(G)$  sur  $Oc(G)$  peut être définie. Nous avons :

$$i.x.j = \sum_y \mathcal{W}_{xy}^{ij} y \quad (1.56)$$

où les coefficients  $\mathcal{W}_{xy}^{ij}$  sont des nombres entiers non-négatifs. Introduisons alors des matrices  $d_O \times d_O V_{ij}$  telles que  $(V_{ij})_{xy} = \mathcal{W}_{xy}^{ij}$ . La compatibilité avec le produit de l'algèbre de fusion  $\mathcal{A}(G)$  est mise en application par la equation

$$i' \cdot (i \cdot x \cdot j) \cdot j' = (i' \cdot i) \cdot x \cdot (j \cdot j')$$

qu'impose aux matrices  $V_{ij}$  la relation suivante

$$V_{ij} \cdot V_{i'j'} = \sum_{i'',j''} \mathcal{N}_{ii''}^{i''} \mathcal{N}_{jj''}^{j''} V_{i''j''} \quad (1.57)$$

**Propriété 5** Les matrices  $V_{ij}$  satisfont les relations suivantes :

$$1. \quad V_{i1} V_{i'1} = \sum_{i''} \mathcal{N}_{ii''}^{i''} V_{i''1}$$

$$V_{1j} V_{1j'} = \sum_{j''} \mathcal{N}_{jj''}^{j''} V_{1j''}$$

$$2. O_x V_{ij} = V_{ij} O_x = \sum_y (V_{ij})_{xy} O_y$$

$$3. V_{ij} = \sum_y (V_{ij})_{0y} O_y$$

**Démonstration** : La relation (1) est obtenue à partir de (1.57) pour  $i = i' = 0$  ( $j=j'=0$ ). La relation (2) est obtenue en multipliant à gauche et à droite l'équation (1.56) par  $\underline{z}$ . Et enfin (3) est une conséquence immédiate de (2). ■

**Conclusion 1** Les matrices  $V_{ij}$  définies à partir de la structure de bi-module de  $Oc(G)$  sur  $A(G)$  coïncident avec les matrices  $\tilde{V}_{ij}$  introduites précédemment. Les fonctions de partition généralisées des modèles  $\widehat{su}(2)$  s'écrivent donc :

$$\mathcal{Z}_{x|y}(\tau) = \sum_{i,j} \chi_i(\tau) \mathcal{W}_{xy}^{ij} \bar{\chi}_j(\tau). \quad (1.58)$$

où les coefficients  $\mathcal{W}_{ij}^{xy}$  sont calculés en explicitant l'action (1.56) de  $\mathcal{A}(G)$  sur  $Oc(G)$ .

**Définition 5** Nous définissons les **matrices toriques généralisées** comme les matrices  $d_A \times d_A$  données par la relation  $(W_{xy})_{i,j} = \mathcal{W}_{xy}^{ij}$ .

Pour  $y = 0$  nous obtenons les **matrices toriques**  $W_x = W_{x0}$ . Il y a une matrice torique pour chaque vertex du graphe  $Oc(G)$

L'action est bien définie et permet d'obtenir des formules compactes pour les expressions des fonctions de partition invariantes modulaires et généralisées. Nous retrouvons ainsi la classification de Cappelli-Itzykson-Zuber et donnons des formules pour les expressions des fonctions de partition à une et deux lignes de défauts de tous les modèles  $\widehat{su}(2)$ .

### 1.5.3 Relations de compatibilité algébrique

**La digèbre  $\mathcal{B}$  : règles de somme (quadratique et linéaire)**

$(\mathcal{B}, \circ)$  et  $(\widehat{\mathcal{B}}, \hat{\circ})$  sont des algèbres semi simples et nous pouvons donc les diagonaliser. Matriciellement nous pouvons les écrire comme une somme de blocs diagonaux :

$$\mathcal{B} \cong \bigoplus_i L^i \quad ; \quad \widehat{\mathcal{B}} \cong \bigoplus_x X^x \quad (1.59)$$

où chaque bloc a la dimension du sous espace  $\mathcal{B}_i$  ou  $\mathcal{B}_x$  correspondant.

$(\mathcal{B}, \circ)$  : Les blocs  $L^i$  sont indexés par la longueur  $i$  des triangles admissibles. Les projecteurs minimaux centraux dans chaque bloc sont labellés par les vertex du graphe  $\mathcal{A}(G)$ . Rappelons que l'élément  $(a, b)$  de la matrice  $F_i$ , pour  $i \in \mathcal{A}(G)$ , est égal au nombre de triangles admissibles  $\{aib\}$ . La dimension de chaque bloc  $L^i$  est donnée par :

$$d_i = \sum_{a,b \in G} (F_i)_{ab} \quad (1.60)$$

Comme  $\mathcal{B} \cong \oplus_i L^i$ , la dimension de  $\mathcal{B}$  est donnée par :

$$\dim(\mathcal{B}) = \sum_{i \in \mathcal{A}(G)} d_i^2 \tag{1.61}$$

$(\widehat{\mathcal{B}}, \widehat{\circ})$  : Les blocs  $X^x$  sont indexés par le label  $x$ . Les projecteurs minimaux centraux de chaque bloc sont labellés par les vertex du graphe  $Oc(G)$ . En analogie avec le cas précédent, la dimension de chaque bloc  $X^x$  est donnée par

$$d_x = \sum_{a,b \in G} (S_x)_{ab} \tag{1.62}$$

où les matrices  $S_x$  déterminent l'action de  $Oc(G)$  sur  $G$  (1.45). Comme  $\widehat{\mathcal{B}} \cong \oplus_x X^x$ , la dimension de  $\widehat{\mathcal{B}}$  est donnée par :

$$\dim(\widehat{\mathcal{B}}) = \sum_{x \in Oc(G)} d_x^2 \tag{1.63}$$

**Règles de somme** Les doubles triangles horizontaux (diagrammes de diffusion verticaux) forment une base  $e_I$  de l'espace  $\mathcal{B}$ . La base dual correspondante  $\widehat{e}^I$  (représentés par des doubles triangles horizontaux avec un tilde) est une base de l'espace dual  $\widehat{\mathcal{B}}$ . Analoguement l'espace dual  $\widehat{\mathcal{B}}$  est engendré par la base des doubles triangles verticaux  $E^J$ , et la base dual  $\widehat{E}_J$  est une base de l'espace  $\mathcal{B}$ . Nous avons alors :

$$\begin{aligned} \mathcal{B} &= \text{gen} \left\{ e_I = \begin{array}{c} a \quad b \\ \diagdown \quad / \\ \bullet \\ \vdots \\ \bullet \\ / \quad \diagdown \\ c \quad d \end{array} \right\} = \text{gen} \left\{ \widehat{E}_J = \begin{array}{c} \widehat{\quad} \\ \diagdown \quad / \\ \bullet \\ \text{---} \\ \bullet \\ / \quad \diagdown \\ c \quad d \end{array} \right\} \\ \widehat{\mathcal{B}} &= \text{gen} \left\{ E^J = \begin{array}{c} a \quad b \\ \diagdown \quad / \\ \bullet \\ \text{---} \\ \bullet \\ / \quad \diagdown \\ c \quad d \end{array} \right\} = \text{gen} \left\{ \widehat{e}^I = \begin{array}{c} \widehat{\quad} \\ \diagdown \quad / \\ \bullet \\ \vdots \\ \bullet \\ / \quad \diagdown \\ c \quad d \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Nous avons l'égalité suivante (**règle de somme quadratique**) :

$$\dim(\mathcal{B}) = \dim(\widehat{\mathcal{B}}) = \sum_{i \in \mathcal{A}(G)} d_i^2 = \sum_{x \in Oc(G)} d_x^2 \tag{1.64}$$

Une autre relation peut aussi être vérifiée dans la plupart des cas<sup>5</sup>, la **règle de somme linéaire** :

$$\sum_{i \in \mathcal{A}(G)} d_i = \sum_{x \in Oc(G)} d_x \tag{1.65}$$

*A priori*, il n'existe pas de raison d'obtenir une telle relation pour une bigèbre semi-simple.

<sup>5</sup>Dans les cas où cette relation n'est pas satisfaite, on sait la corriger.

### Masses quantiques, graphes ADE

Pour un graphe  $G$  du système  $SU(2)$ , les composantes du vecteur normalisé de Peron-Frobenius définissent les dimensions quantiques des vertex  $\sigma$  de  $G$  : ce sont des nombres quantiques  $[n]_q = qdim(\sigma)$ . Rappelons que le nombre quantique  $[n]_q$  est défini par :

$$[n]_q = \frac{q^n - q^{-n}}{q - q^{-1}}, \quad q = \exp\left(\frac{i\pi}{\kappa}\right), \quad q^{2\kappa} = 1. \quad (1.66)$$

Ces nombres s'écrivent explicitement :

$$\begin{aligned} \text{n pair} \quad [n]_q &= q + q^{-1} + q^3 + q^{-3} + q^5 + q^{-5} + \dots + q^{n-1} + q^{-(n-1)} \\ &= 2 \cos\left(\frac{\pi}{\kappa}\right) + 2 \cos\left(\frac{3\pi}{\kappa}\right) + 2 \cos\left(\frac{5\pi}{\kappa}\right) + 2 \cos\left(\frac{(n-1)\pi}{\kappa}\right) \\ \text{n impair} \quad [n]_q &= 1 + q^2 + q^{-2} + q^4 + q^{-4} + q^6 + q^{-6} + \dots + q^{n-1} + q^{-(n-1)} \\ &= 1 + 2 \cos\left(\frac{2\pi}{\kappa}\right) + 2 \cos\left(\frac{4\pi}{\kappa}\right) + 2 \cos\left(\frac{6\pi}{\kappa}\right) + 2 \cos\left(\frac{(n-1)\pi}{\kappa}\right) \end{aligned}$$

**Définition 6** Pour un graphe  $G$  de type ADE à  $r$  vertex  $a$ , sa **masse quantique**  $m(G)$  est définie par :

$$m(G) = \sum_{a \in G} (qdim(a))^2 \quad (1.67)$$

**Propriété 6** Soit un graphe  $G$  un graphe ADE ou de Di Francesco-Zuber, et  $\mathcal{A}(G)$  et  $Oc(G)$  ses graphes associés. Alors les masses quantiques de  $\mathcal{A}(G)$  et de  $Oc(G)$  sont égales :

## 1.6 Un exemple de symétries quantiques des graphes du système $SU(2)$ , les graphes $A_2$ .

Considérons le graphe  $A_2$  du système  $SU(2)$ , il possède deux vertex que nous allons noter par 0 et 1, ce dernier étant le générateur. Le graphe et sa matrice d'adjacence sont présentés dans la Figure 1.4.



FIG. 1.4 – Le diagramme de Dynkin  $A_2$  et sa matrice d'adjacence

La table de multiplication  $2 \times 2$  de l'algèbre de graphe  $A_2$  peut être construite à partir de la multiplication par le générateur 1 plus l'associativité du produit. La table de multiplication de l'algèbre est comme suit :

$$\begin{array}{c|cc} \cdot & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{array}$$

A partir de cette table de multiplication nous pouvons lire les éléments de l'espace vectoriel des triangles admissibles  $H$ , qui est engendré par les quatre triangles suivants :

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{0} = \begin{array}{c} 0 \quad 0 \\ \diagdown \quad / \\ | \\ 0 \end{array} ; \quad \mathbf{1} = \begin{array}{c} 1 \quad 1 \\ \diagdown \quad / \\ | \\ 0 \end{array} \\
 \\
 \mathbf{r} = \begin{array}{c} 0 \quad 1 \\ \diagdown \quad / \\ | \\ 1 \end{array} ; \quad \mathbf{l} = \begin{array}{c} 1 \quad 0 \\ \diagdown \quad / \\ | \\ 1 \end{array}
 \end{array} \Bigg| = \text{base de } H . \tag{1.68}$$

Un élément général de la base de  $H$  est le vecteur  $|i \xrightarrow{k} j\rangle = \begin{array}{c} i \quad j \\ \diagdown \quad / \\ | \\ k \end{array}$  avec  $(i, k, j)$  un

triangle admissible du garphe  $A_2$ . L'espace dual  $\widehat{H}$  est engendré par les vecteurs de la base dual  $\langle i \xrightarrow{k} j | = \begin{array}{c} k \\ / \quad \backslash \\ i \quad j \end{array}$ , où  $(i, k, j)$  est un triangle admissible. La base dual de  $\{0, 1, r, l\}$  est

noté  $\{\hat{0}, \hat{1}, \hat{r}, \hat{l}\}$ , les triangles  $r = |0 \xrightarrow{1} 1\rangle$  et  $l = |1 \xrightarrow{1} 0\rangle$  correspondent a des chemins élémentaires (orientés a droite et à gauche respectivement) sur le graphe  $A_2$ .

Ces deux bases sont duales, et l'action de  $\widehat{H}$  sur  $H$  est donne par definition comme  $\langle i \xrightarrow{k} j | i' \xrightarrow{k'} j' \rangle = \delta_{ii'} \delta_{jj'} \delta_{kk'}$ . Ce qui correspond de maniere naturelle au collage suivante des triangles de chaque espace :

$$\begin{array}{c} k \\ / \quad \backslash \\ i \quad j \\ \backslash \quad / \\ i' \quad j' \\ \backslash \quad / \\ k' \end{array} = \langle i \xrightarrow{k} j | i' \xrightarrow{k'} j' \rangle = \delta_{ii'} \delta_{jj'} \delta_{kk'} \tag{1.69}$$

### 1.6.1 L'agèbre $(\mathcal{B}, \circ)$

Nous allons construire l'espace vectoriel de doubles triangles  $\mathcal{B} = \text{End}(H) \cong H \otimes \widehat{H}$ . Il est engendré par la collection de doubles triangles  $|i \xrightarrow{k} j\rangle \langle i' \xrightarrow{k} j'|$ , représenté par des diagramme collés par l'arête donnant la longueur  $k$ .  $\mathcal{B}$  est un espace vectoriel gradue par l'index  $k$  et s'écrit comme somme des sous-espaces de longueur fixe

$$\mathcal{B} = \text{End}(H_0) \oplus \text{End}(H_1) = \mathcal{B}_0 \oplus \mathcal{B}_1$$

où chaque sous espace est  $\mathcal{B}_p \cong H_p \otimes \widehat{H}_p$ . La base de  $\mathcal{B}$  a la représentation diagrammatique suivante :

$$\begin{array}{cccc}
 k = 0 & \begin{array}{c} 0 \quad 0 \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \\ | \\ \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ 0 \quad 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \quad 0 \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \\ | \\ \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ 1 \quad 1 \end{array} & \begin{array}{c} 1 \quad 1 \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \\ | \\ \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ 0 \quad 0 \end{array} & \begin{array}{c} 1 \quad 1 \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \\ | \\ \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ 1 \quad 1 \end{array} \\
 & & & & \\
 k = 1 & \begin{array}{c} 0 \quad 1 \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \\ | \\ \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ 0 \quad 1 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \quad 1 \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \\ | \\ \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ 1 \quad 0 \end{array} & \begin{array}{c} 1 \quad 0 \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \\ | \\ \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ 0 \quad 1 \end{array} & \begin{array}{c} 1 \quad 0 \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \\ | \\ \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ 1 \quad 0 \end{array}
 \end{array} \tag{1.70}$$

L'action de l'espace dual  $\widehat{H}$  muni à  $H$  d'un produit scalaire qui permet d'identifier  $H$  avec  $\widehat{H}$  Alors  $\mathcal{B}$  peut être identifié avec l'espace

$$\mathcal{B} \cong (H_0 \otimes H_0) \oplus (H_1 \otimes H_1).$$

Nous allons noter chaque bloc de la base de  $\mathcal{B}$  de manière compacte comme  $\mathcal{B}_0 = \{00, 01, 10, 11\}$ ,  $\mathcal{B}_1 = \{rr, rl, lr, ll\}$ ,

L'espace vectoriel  $\mathcal{B}$  est muni de la structure d'algèbre définie par le **produit vertical** définie par l'équation (1.23). La table de multiplication de cette algèbre finie est comme suit :

$\circ \nearrow$	00	01	10	11	rr	rl	lr	ll
00	00	01	.	.	.	.	.	.
01	.	.	00	01	.	.	.	.
10	10	11	.	.	.	.	.	.
11	.	.	10	11	.	.	.	.
rr	.	.	.	.	rr	rl	.	.
rl	.	.	.	.	.	.	rr	rl
lr	.	.	.	.	lr	ll	.	.
ll	.	.	.	.	.	.	lr	ll

l'élément neutre du produit de la table précédente est  $\mathbf{1} = 00 + 11 + rr + ll$

A partir de la table de multiplication nous pouvons définir les deux projecteurs

$$\pi_0 = 00 + 11 \quad \text{and} \quad \pi_1 = rr + ll. \tag{1.71}$$

Ce sont des projecteurs minimaux centraux, ils sont orthogonaux et la somme  $\pi_0 + \pi_1$  est égale à l'unité. Nous allons définir les idéaux  $\pi_0\mathcal{B} = \pi_0\mathcal{B}\pi_0$  and  $\pi_1\mathcal{B} = \pi_1\mathcal{B}\pi_1$ , formant les deux

blocs :

$$\begin{aligned}\mathcal{B}_0 &= \pi_0 \mathcal{B} \text{ espace engendré par } \{00, 01, 10, 11\} \\ \mathcal{B}_1 &= \pi_1 \mathcal{B} \text{ espace engendré par } \{rr, rl, lr, ll\}\end{aligned}$$

Chaque bloc est de dimension quatre, l'algèbre  $\mathcal{B}$  est semi simple et chaque bloc peut être écrit comme matrices complexes de dimension  $2 \times 2$ . Nous allons identifier les éléments de la base  $\{00, 01, 10, 11; rr, rl, lr, ll\}$  avec les unités matricielles correspondant aux blocs  $\mathcal{B}_0$  et  $\mathcal{B}_1$  de la manière suivante :

$$\begin{array}{cccc} \left( \begin{array}{cc|c} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \hline & & 0 \\ 0 & & 0 \end{array} \right) & \left( \begin{array}{cc|c} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \hline & & 0 \\ 0 & & 0 \end{array} \right) & \left( \begin{array}{cc|c} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \hline & & 1 \\ 0 & & 0 \end{array} \right) & \left( \begin{array}{cc|c} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \hline & & 0 \\ 0 & & 1 \end{array} \right) \\ \left( \begin{array}{cc|c} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ \hline & & 0 \\ 0 & & 0 \end{array} \right) & \left( \begin{array}{cc|c} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \hline & & 0 \\ 0 & & 0 \end{array} \right) & \left( \begin{array}{cc|c} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \hline & & 0 \\ 0 & & 1 \end{array} \right) & \left( \begin{array}{cc|c} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \hline & & 0 \\ 0 & & 0 \end{array} \right) \end{array}$$

avec cette identification la multiplication matricielle reproduit bien le produit  $\circ$ .

### 1.6.2 La cogèbre $(\mathcal{B}, \Delta)$

Nous allons définir sur  $\mathcal{B}$  un coproduit compatible avec le produit vertical  $\circ$ . La de  $\Delta$  sur  $\mathcal{B}$  est moins évidente que celle du produit  $\circ$  (rappelons nous que  $\circ$  est le produit naturel associé aux diagrammes verticaux). Pour  $SU(2)$  la construction du coproduit  $\Delta$  peut se faire a partir de différents méthodes reposant sur la définition des cellules de Ocneanu, les valeurs des cellules basiques et les propriétés de réflexion et unitariété (voir equations  $A_1$  a  $A_7$ ). Ici nous sommes intéressés en montrer la structure générale de  $\mathcal{B}$  et nous allons montrer le coproduit explicitement. L'action de  $\Delta$  sur la base de  $\mathcal{B}$  est la suivante :

$$\begin{aligned}\Delta 00 &= 00 \otimes 00 + rr \otimes ll & \Delta rr &= 00 \otimes rr + rr \otimes 11 \\ \Delta 01 &= 01 \otimes 01 + rl \otimes lr & \Delta rl &= 01 \otimes rl + rl \otimes 10 \\ \Delta 10 &= 10 \otimes 10 + lr \otimes rl & \Delta lr &= 10 \otimes lr + lr \otimes 01 \\ \Delta 11 &= 11 \otimes 11 + ll \otimes rr & \Delta ll &= 11 \otimes ll + ll \otimes 00\end{aligned} \tag{1.72}$$

Le coproduit est compatible avec la structure de l'algèbre  $(\mathcal{B}, \circ)$ , c'est a dire l'application  $\Delta$  est un homomorphisme entre l'espace  $\mathcal{B}$  et sont carré tensoriel. Pour le vérifier nous considérons la multiplication naturelle dans le espace produit tensoriel, celle-ci est définie comme  $(i \otimes j) \circ (m \otimes n) = (i \circ m) \otimes (j \circ n)$ , la compatibilité du coproduit avec cette multiplication s'écrit

$$\Delta(i \circ j) = \Delta i \circ \Delta j .$$

Cette propriété est vérifié pour chacune des entrées de la table de multiplication (voir [19]).

A partir de la définition du coproduit nous pouvons calculer le coproduit de la identité

$$\Delta \mathbf{1} = (00 + ll) \otimes (00 + rr) + (rr + 11) \otimes (ll + 11)$$

Il est clais que  $\Delta \mathbf{1}$  n'est pas égal à  $\mathbf{1} \otimes \mathbf{1}$ , ceci veut dire que  $\mathcal{B}$  ne peut pas être une bigèbre au sens usuel. Néanmoins le résultat antérieur suggère d'écrire le coproduit de l'identité comme

$$\Delta \mathbf{1} = \mathbf{1}_t \otimes \mathbf{1}_s = t_0 \otimes s_0 + t_1 \otimes s_1,$$

où chaque composante est définie de la manière suivante

$$\begin{aligned} t_0 &= (00 + ll) & s_0 &= (00 + rr) \\ t_1 &= (rr + 11) & s_1 &= (ll + 11) \end{aligned}$$

ces éléments constituent la base des sous algèbres *source*  $\mathcal{B}_s$  et *target*  $\mathcal{B}_t$  que nous avons défini dans la section 1.3.

La counité  $\epsilon$  doit être telle que le diagramme commutatif usuel soit satisfait, ceci implique que nous avons un système de 4 + 4 équations que doit être résolu. Les premières quatre équations sont

$$\begin{aligned} \epsilon(00)00 + \epsilon(rr)ll &= 00 & \epsilon(01)01 + \epsilon(rl)lr &= 01 \\ \epsilon(10)10 + \epsilon(lr)rl &= 10 & \epsilon(11)11 + \epsilon(ll)rr &= 11 \end{aligned}$$

avec pour solution

$$\begin{aligned} \epsilon(00) &= \epsilon(01) = \epsilon(10) = \epsilon(11) = 1 \\ \epsilon(rr) &= \epsilon(rl) = \epsilon(lr) = \epsilon(ll) = 0 \end{aligned}$$

Nous pouvons vérifier, par un calcul direct, que ses solutions satisfont aussi les autres quatre équations. Nous avons alors que  $(\mathcal{B}, \circ, \Delta, \mathbf{1}, \epsilon)$  est une bigèbre unitale et counitale dans le sens faible. En effet la counité n'est pas un homomorphisme car l'aplcation est tordue par les éléments que apparaissent dans le membre de droite de  $\Delta \mathbf{1}$ . Dans le cas présent la condition de compatibilité est modifié comme suit

$$\epsilon(\xi\xi' \circ \eta\eta') = \epsilon(\xi\xi' \mathbf{1}_t)\epsilon(\eta\eta' \mathbf{1}_s)$$

où  $\xi\xi'$  et  $\eta\eta'$  sont deux elements quelconques de  $\mathcal{B}$ . Finalement nous allons juste mentionner que l'espace  $\mathcal{B}$  a aussi une antipode  $S$  définie par l'interchange simultanée des étiquettes en haut et en bas, droite et gauche des diagrammes de diffusion de la base. La condition de compatibilité est prise aussi dans le sens faible [14] [19].

1.6.3 L'algèbre dual  $(\widehat{\mathcal{B}}, \widehat{\circ})$

L'espace dual  $\widehat{\mathcal{B}}$  est engendré par la base duale  $\{\widehat{00}, \widehat{01}, \widehat{10}, \widehat{11}, \widehat{r\bar{r}}, \widehat{r\bar{l}}, \widehat{l\bar{r}}, \widehat{l\bar{l}}\}$ , représenté à l'aide des diagrammes verticaux

Le coproduit  $\Delta$ , défini dans l'espace  $\mathcal{B}$ , induit un produit  $\widehat{\circ}$  dans l'espace dual  $\widehat{\mathcal{B}}$ . Une observation est que cette correspondance est canonique et ne demande pas le choix d'un produit escalier. A partir de la table de comultiplication 1.72 de *Delta* nous trouvons la table de multiplication suivante :

$\widehat{\circ}$ ↗	$\widehat{00}$	$\widehat{01}$	$\widehat{10}$	$\widehat{11}$	$\widehat{r\bar{r}}$	$\widehat{r\bar{l}}$	$\widehat{l\bar{r}}$	$\widehat{l\bar{l}}$
$\widehat{00}$	$\widehat{00}$	.	.	.	$\widehat{r\bar{r}}$	.	.	.
$\widehat{01}$	.	$\widehat{01}$	.	.	.	$\widehat{r\bar{l}}$	.	.
$\widehat{10}$	.	.	$\widehat{10}$	.	.	.	$\widehat{l\bar{r}}$	.
$\widehat{11}$	.	.	.	$\widehat{11}$	.	.	.	$\widehat{l\bar{l}}$
$\widehat{r\bar{r}}$	.	.	.	$\widehat{r\bar{r}}$	.	.	.	$\widehat{00}$
$\widehat{r\bar{l}}$	.	.	$\widehat{r\bar{l}}$	.	.	.	$\widehat{01}$	.
$\widehat{l\bar{r}}$	.	$\widehat{l\bar{r}}$	.	.	.	$\widehat{10}$	.	.
$\widehat{l\bar{l}}$	$\widehat{l\bar{l}}$	.	.	.	$\widehat{11}$	.	.	.

avec unité  $\widehat{\mathbf{1}} = \widehat{00} + \widehat{01} + \widehat{10} + \widehat{11}$ <sup>6</sup>.

Les projecteurs minimaux centraux sont aussi déterminés à partir de la table de multiplication de  $(\widehat{\mathcal{B}}, \widehat{\circ})$ , nous avons :

$$\varpi_0 = \widehat{00} + \widehat{11} \quad \text{and} \quad \varpi_1 = \widehat{01} + \widehat{10}$$

Ces projecteurs sont orthogonaux et sa sommation est égale à la unité  $\widehat{\mathbf{1}}$ , les deux blocs de dimension 4 sont des idéaux  $\varpi_0 \widehat{\mathcal{B}} = \{\widehat{00}, \widehat{11}, \widehat{r\bar{r}}, \widehat{l\bar{l}}\}$  et  $\varpi_1 \widehat{\mathcal{B}} = \{\widehat{01}, \widehat{10}, \widehat{r\bar{l}}, \widehat{l\bar{r}}\}$ .

Nous appelons  $\widehat{\mathcal{B}}_0 = \varpi_0 \widehat{\mathcal{B}}$ , dans ce sous espace les éléments  $\widehat{00}$  et  $\widehat{11}$  sont des projecteurs, mais  $\widehat{r\bar{r}}$  et  $\widehat{l\bar{l}}$  ne le sont pas. Nous définissons les deux projecteurs supplémentaires :  $\widehat{\mathcal{B}}_0 = \widehat{\mathcal{B}}_0 \widehat{\circ} \widehat{00} \oplus \widehat{\mathcal{B}}_0 \widehat{\circ} \widehat{11} = \{\widehat{00}, \widehat{l\bar{l}}\} \oplus \{\widehat{11}, \widehat{r\bar{r}}\}$ . En termes de matrices le sous espace  $\widehat{\mathcal{B}}_0$  correspond au premier bloc (une sous matrice de dimension  $2 \times 2$ ),  $\widehat{\mathcal{B}}_0 \widehat{\circ} \widehat{00}$  est la première colonne du premier bloc, et  $\widehat{\mathcal{B}}_0 \widehat{\circ} \widehat{11}$  est la deuxième colonne. Nous avons alors la structure matricielle suivante pour les éléments de  $\widehat{\mathcal{B}}_0$

<sup>6</sup>La unité  $\widehat{\mathbf{1}}$  pouvait aussi être déterminé à partir de l'expression de la counité  $\epsilon$  que nous avons donc dans la sub section précédente.

$$\left( \begin{array}{c|c} \widehat{00} \widehat{\mathcal{B}}_0 \widehat{00} = \{\widehat{00}\} & \widehat{00} \widehat{\mathcal{B}}_0 \widehat{11} = \{\widehat{r\bar{r}}\} \\ \hline \widehat{11} \widehat{\mathcal{B}}_0 \widehat{00} = \{\widehat{l\bar{l}}\} & \widehat{11} \widehat{\mathcal{B}}_0 \widehat{11} = \{\widehat{11}\} \end{array} \right)$$

Nous appelons  $\widehat{\mathcal{B}}_1 = \varpi_1 \widehat{\mathcal{B}}$ , dans ce sous espace les éléments  $\widehat{01}$  and  $\widehat{10}$  sont des projecteurs, mais les éléments  $\widehat{l\bar{r}}$  and  $\widehat{r\bar{l}}$  ne le sont pas. Nous définissons les deux projecteurs supplémentaires :  $\widehat{\mathcal{B}}_1 = \widehat{\mathcal{B}}_1 \widehat{01} \oplus \widehat{\mathcal{B}}_1 \widehat{10} = \{\widehat{01}, \widehat{l\bar{r}}\} \oplus \{\widehat{10}, \widehat{r\bar{l}}\}$  En termes de matrices le sous espace  $\widehat{\mathcal{B}}_0$  est le deuxième bloc (une sous matrice de dimension  $2 \times 2$ ), et  $\widehat{\mathcal{B}}_1 \widehat{01}$  correspond à la première colonne de ce bloc ( $\widehat{\mathcal{B}}_1 \widehat{10}$  correspond à la deuxième colonne de ce bloc. En termes de matrices, nous avons la structure suivante pour  $\widehat{\mathcal{B}}_1$

$$\left( \begin{array}{c|c} \widehat{01} \widehat{\mathcal{B}}_1 \widehat{01} = \{\widehat{01}\} & \widehat{01} \widehat{\mathcal{B}}_1 \widehat{10} = \{\widehat{r\bar{l}}\} \\ \hline \widehat{10} \widehat{\mathcal{B}}_1 \widehat{01} = \{\widehat{l\bar{r}}\} & \widehat{10} \widehat{\mathcal{B}}_1 \widehat{10} = \{\widehat{10}\} \end{array} \right)$$

Nous identifions alors les éléments de la base  $\{\widehat{00}, \widehat{01}, \widehat{10}, \widehat{11}, \widehat{r\bar{r}}, \widehat{r\bar{l}}, \widehat{l\bar{r}}, \widehat{l\bar{l}}\}$  de  $\widehat{\mathcal{B}}$  avec les unités matricielles des sous espaces  $\widehat{\mathcal{B}}_0$  and  $\widehat{\mathcal{B}}_1$  de la manière suivante :

$$\begin{array}{cccc} \begin{array}{c|c} \widehat{00} & \\ \hline \begin{array}{cc} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \end{array} & \begin{array}{c|c} \widehat{r\bar{r}} & \\ \hline \begin{array}{cc} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \end{array} & \begin{array}{c|c} \widehat{01} & \\ \hline \begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{cc} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \end{array} & \begin{array}{c|c} \widehat{r\bar{l}} & \\ \hline \begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{cc} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{array} \end{array} \\ \begin{array}{c|c} \widehat{l\bar{l}} & \\ \hline \begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \end{array} & \begin{array}{c|c} \widehat{11} & \\ \hline \begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \end{array} & \begin{array}{c|c} \widehat{l\bar{r}} & \\ \hline \begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{array} \end{array} & \begin{array}{c|c} \widehat{10} & \\ \hline \begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{array} \end{array} \end{array}$$

Ces calculs montrent que, pour  $A_2$ , le dual de la base des unités matricielles du produit  $\circ$  dans  $\mathcal{B}$  est aussi une base des unités matricielles pour la multiplication  $\widehat{\circ}$  dans  $\widehat{\mathcal{B}}$ , mais cette dernière ne apparaît pas gradée de la même manière. Cette situation est particulière du cas  $A_2$  (bien que nous allons voir que la situation est la même pour le cas  $A_1$  de  $SU(3)$ ) et ne se vérifie pour les cas de niveau plus haut. Cette propriété peut aussi être interprétée en termes des cellules puisque ces dernières ont toutes valeur égal à 1.

### La base des diagrammes horizontaux

Considérons l'espace vectoriel  $\mathcal{B}$ , nous l'avons défini à partir de  $\mathcal{H}$  comme l'espace engendré par les endomorphismes de  $H$ .  $\mathcal{B}$  est un espace gradué par la longueur  $End \mathcal{H}^0 \oplus End \mathcal{H}^1$ , et nous avons déterminé les unités matricielles correspondant aux blocs semisimples.

Pour l'espace dual  $\widehat{\mathcal{B}}$  la situation est similaire, mais nous avons commencé à partir d'une base différente, la base dual. La table de multiplication est déterminée par dualité à partir du coproduit dans  $\mathcal{B}$ , et nous avons trouvé que l'algèbre est composée de deux blocs simples. Alors il est naturel d'écrire  $\widehat{\mathcal{B}}$  comme  $\widehat{\mathcal{B}} \cong End \mathcal{V}^0 \oplus End \mathcal{V}^1$  pour un certain espace vectoriel (gradué)  $\mathcal{V} = \mathcal{V}^0 \oplus \mathcal{V}^1$ .  $\mathcal{V}$  est appelé l'espace vectoriel horizontal, et est engendré par les diagrammes

de diffusion horizontaux (doubles triangles verticaux). Les unités matricielles que nous avons construit pour  $\widehat{\mathcal{B}}$  sont associés de manière naturelle aux éléments de la base horizontale, et les blocs sont définis par la longueur horizontale  $x = 0$  ou 1. La base horizontale est donnée par les diagrammes duaux suivants :

Diagrammes de diffusion de longueur horizontale  $x = 0$  (premier bloc) :

$$\widehat{00} \equiv \begin{array}{c} 0 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 0 \end{array} \text{---} \begin{array}{c} 0 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 0 \end{array}, \quad \widehat{r\hat{r}} \equiv \begin{array}{c} 0 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 0 \end{array} \text{---} \begin{array}{c} 1 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 1 \end{array}, \quad \widehat{l\hat{l}} \equiv \begin{array}{c} 1 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 1 \end{array} \text{---} \begin{array}{c} 0 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 0 \end{array}, \quad \widehat{1\hat{1}} \equiv \begin{array}{c} 1 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 1 \end{array} \text{---} \begin{array}{c} 1 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 1 \end{array}$$

Diagrammes de diffusion de longueur horizontale  $x = 1$  (deuxième bloc) :

$$\widehat{01} \equiv \begin{array}{c} 0 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 1 \end{array} \text{---} \begin{array}{c} 1 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 1 \end{array} \begin{array}{c} 0 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 0 \end{array}, \quad \widehat{r\hat{l}} \equiv \begin{array}{c} 0 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 1 \end{array} \text{---} \begin{array}{c} 1 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 0 \end{array} \begin{array}{c} 1 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 1 \end{array}, \quad \widehat{l\hat{r}} \equiv \begin{array}{c} 1 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 0 \end{array} \text{---} \begin{array}{c} 1 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 1 \end{array} \begin{array}{c} 0 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 0 \end{array}, \quad \widehat{1\hat{0}} \equiv \begin{array}{c} 1 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 0 \end{array} \text{---} \begin{array}{c} 1 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 1 \end{array} \begin{array}{c} 1 \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ 0 \end{array}$$

Une remarque est que les arêtes externes de ses graphes sont exactement les mêmes que celles de la base duale, la seule chose ayant changé est la gradation qui maintenant est donnée par les arêtes internes horizontales étiquetées par  $x$ .

### Changement de base

Formellement il y a deux types de cellules intervenant dans ce problème, les cellules qui donnent le pairing des unités matricielles de  $\widehat{\circ}$  (dans  $\widehat{\mathcal{B}}$ ) avec les unités matricielles de  $\circ$  (dans  $\mathcal{B}$ ), et celles donnant respectivement le pairing des deux bases avec ses bases duales. Il s'agit des coefficients  $F_2$ ,  $F_0$  et  $F_4$  respectivement. Pour le cas  $A_2$  cette distinction n'est pas nécessaire puisque les valeurs numériques et les types de vertex sont les mêmes. Les cellules obéissent aux propriétés  $(A_1)$  jusqu'à  $(A_7)$  permettant de déterminer les valeurs des cellules basiques, les autres sont construites par composition verticale ou horizontales. Pour  $A_2$  il est aussi possible de déterminer les valeurs des cellules à travers de formules générales [20].

Dans l'approche que nous présentons ici, les constantes de structure du coproduit dans  $\mathcal{B}$ , sont considérées comme connues<sup>7</sup>

Dans le cas particulier de  $A_2$  il y a seulement deux cellules basiques qui sont la réflexion verticale l'une de l'autre (propriété  $A_2$ ).

$$\begin{array}{c} 0 \quad 0 \quad 1 \\ \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \\ \square \\ \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \\ 1 \quad r \end{array} = 1 \quad \begin{array}{c} 1 \quad 1 \quad 0 \\ \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \\ \square \\ \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \\ 0 \quad l \end{array} = 1$$

<sup>7</sup>En général la difficulté de ce problème consiste précisément en la détermination des constantes de structure de  $\Delta$  (ou de manière équivalente  $\widehat{\circ}$ ), la seule méthode connue pour le faire consiste en calculer les cellules basiques et les cellules générales (par composition), et utiliser ces valeurs pour déterminer les unités matricielles du produit  $\widehat{\circ}$  en termes de la base duale de  $\widehat{\mathcal{B}}$ . Mais ici l'intérêt est de présenter la structure du groupoïde quantique de  $A_2$ .

### 1.6.4 Algèbre de fusion et algèbre de symétries quantiques

Nous allons multiplier les projecteurs  $\pi$  avec le produit  $\hat{\circ}$  et les projecteurs  $\varpi$  avec le produit  $\circ$ . A priori ces multiplications ne sont pas définies, pour les faire il nous faut écrire les éléments de la base de  $\mathcal{B}$  (ou  $\hat{\mathcal{B}}$ ) qui apparaissent dans la expression de  $\pi$  (ou  $\varpi$ ) en termes des éléments de la base duale, comme nous avons expliqué dans les sections précédentes. Mais dans le cas de  $A_2$  les bases sont identifiées, et nous pouvons oublier cette formalité.

**Algèbre de fusion  $A(A_2)$**  Les opérateurs  $\pi_i$  constituent un système complet de projecteurs minimaux et orthogonaux pour la multiplication  $\circ : \pi_0 \circ \pi_0 = \pi_0, \pi_1 \circ \pi_1 = \pi_1, \pi_0 \circ \pi_1 = \mathbf{0}, \pi_0 + \pi_1 = \mathbf{1}$ . Ces opérateurs génèrent le centre de  $(\mathcal{B}, \circ)$ , et nous pouvons vérifier que cet espace est fermé pour le produit  $\hat{\circ}$  :

$$\pi_0 \hat{\circ} \pi_0 = \pi_0, \quad \pi_0 \hat{\circ} \pi_1 = \pi_1, \quad \pi_1 \hat{\circ} \pi_0 = \pi_1, \quad \pi_1 \hat{\circ} \pi_1 = \pi_0.$$

L'algèbre associative engendré par les projecteurs  $\pi_i$  est isomorphe à l'algèbre de graphe  $A_2$ .

**L'algèbre de symétries quantiques  $Oc(A_2)$**  Les opérateurs  $\varpi$  constituent un système complet de projecteurs minimaux et orthogonaux pour la multiplication  $\hat{\circ} : \varpi_0 \hat{\circ} \varpi_0 = \varpi_0, \varpi_1 \hat{\circ} \varpi_1 = \varpi_1, \varpi_0 \hat{\circ} \varpi_1 = \mathbf{0}, \varpi_0 + \varpi_1 = \hat{\mathbf{1}}$ . Ces opérateurs génèrent le centre de  $(\hat{\mathcal{B}}, \hat{\circ})$ , et nous pouvons vérifier que cet espace est fermé pour le produit  $\circ$  :

$$\varpi_0 \circ \varpi_0 = \varpi_0, \quad \varpi_0 \circ \varpi_1 = \varpi_1, \quad \varpi_1 \circ \varpi_0 = \varpi_1, \quad \varpi_1 \circ \varpi_1 = \varpi_0.$$

L'algèbre associative engendré par les projecteurs  $\pi_i$  est isomorphe à l'algèbre de graphe  $A_2$ . En général, pour un graphe  $G$  du système *ADE* l'algèbre obtenue à partir des projecteurs  $\varpi$  est différente de  $\mathcal{A}(G)$  et correspond à l'algèbre de symétries quantiques codé par le graphe d'Ocneanu  $Oc(G)$ . Ici ce graphe est le graphe  $A_2$  lui même.

## 1.7 Un exemple de symétries quantiques des graphes du système $SU(3)$ , les graphes $\mathcal{A}_1$ .

Considérons le graphe  $\mathcal{A}_1$  du système  $SU(3)$ , il possède trois vertex que nous allons noter par 0, 1 (le générateur) et son conjugué  $\bar{1}$ . Le graphe et sa matrice d'adjacence sont présentés dans la Figure 1.5, les flèches étiquetées par les lettres  $r, u, d$  indiquent les chemins élémentaires sur le graphe, on verra qu'il sont en correspondance avec les triangles admissibles de longueur 1.

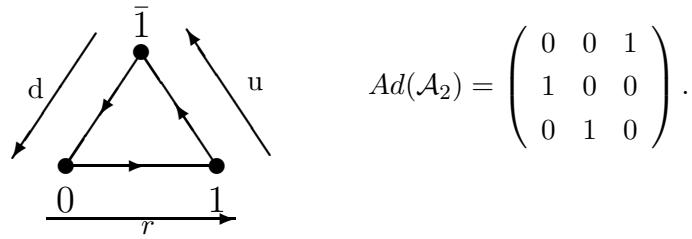


FIG. 1.5 – Le graphe  $\mathcal{A}_1$  de  $SU(3)$  et sa matrice d'adjacence.

La table de multiplication  $3 \times 3$  de l'algèbre de graphe  $\mathcal{A}_1$  peut être construite à partir de la multiplication par le générateur 1 et en utilisant l'associativité, la table est comme suit :

·	0	1	$\bar{1}$
0	0	1	$\bar{1}$
1	1	$\bar{1}$	0
$\bar{1}$	$\bar{1}$	0	1

La conjugaison est définie par  $0^* = 0$  et  $1^* = \bar{1}$ , la conjugaison n'étant pas triviale nous sommes obligés de garder l'orientations des arcs dans les diagrammes de diffusion ; l'espace vectoriel des triangles admissibles  $H$  est engendré par les neuf triangles suivants :

$$\begin{array}{l}
 \mathbf{0} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} 0 & 0 \\ \swarrow & \searrow \\ \text{Y} \\ \uparrow \\ 0 \end{array} ; \quad \mathbf{1} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} 1 & 1 \\ \swarrow & \searrow \\ \text{Y} \\ \uparrow \\ 0 \end{array} ; \quad \bar{\mathbf{1}} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} \bar{1} & \bar{1} \\ \swarrow & \searrow \\ \text{Y} \\ \uparrow \\ 0 \end{array} \\
 \\
 \mathbf{r} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} 0 & 1 \\ \swarrow & \searrow \\ \text{Y} \\ \uparrow \\ 1 \end{array} ; \quad \mathbf{u} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} 1 & \bar{1} \\ \swarrow & \searrow \\ \text{Y} \\ \uparrow \\ 1 \end{array} ; \quad \mathbf{d} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} \bar{1} & 0 \\ \swarrow & \searrow \\ \text{Y} \\ \uparrow \\ 1 \end{array} \\
 \\
 \bar{\mathbf{r}} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} 1 & 0 \\ \swarrow & \searrow \\ \text{Y} \\ \uparrow \\ \bar{1} \end{array} ; \quad \bar{\mathbf{u}} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} \bar{1} & 1 \\ \swarrow & \searrow \\ \text{Y} \\ \uparrow \\ \bar{1} \end{array} ; \quad \bar{\mathbf{d}} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} 0 & \bar{1} \\ \swarrow & \searrow \\ \text{Y} \\ \uparrow \\ \bar{1} \end{array}
 \end{array} \Bigg| = \text{base de } H . \quad (1.74)$$

Un élément général de la base de  $H$  est le vecteur  $|i \xrightarrow{k} j\rangle = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} i & j \\ \swarrow & \searrow \\ \text{Y} \\ \uparrow \\ k \end{array}$  avec  $(i, k, j)$  un triangle admissible de l'algèbre de graphe  $\mathcal{A}_1$ . L'espace dual  $\hat{H}$  est engendré par les vecteurs  $\langle i \xrightarrow{k} j| = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} & k \\ \uparrow & \\ i & j \end{array}$ , où  $(i, k, j)$  est un triangle admissible. Une observation est que si  $(i, k, j)$  est un triangle admissible, alors  $(\bar{i}, \bar{k}, \bar{j})$  est aussi un triangle admissible et nous pouvons

choisir entre deux représentations pour la base de  $\hat{H}$   $\begin{array}{c} \begin{array}{cc} & k \\ \uparrow & \\ i & j \end{array}$  ou  $\begin{array}{c} \begin{array}{cc} \bar{k} & \\ \uparrow & \\ \bar{i} & \bar{j} \end{array}$ . Nous allons noter les

éléments de la base de  $\hat{H}$

$$\begin{array}{ccc}
 \hat{\mathbf{0}} = \begin{array}{c} 0 \\ \uparrow \\ \swarrow \downarrow \\ 0 \quad 0 \end{array} ; & \hat{\mathbf{1}} = \begin{array}{c} 0 \\ \uparrow \\ \swarrow \downarrow \\ 1 \quad 1 \end{array} ; & \hat{\bar{\mathbf{1}}} = \begin{array}{c} 0 \\ \uparrow \\ \swarrow \downarrow \\ \bar{1} \quad \bar{1} \end{array} \\
 \hat{r} = \begin{array}{c} 1 \\ \uparrow \\ \swarrow \downarrow \\ 0 \quad 1 \end{array} ; & \hat{u} = \begin{array}{c} 1 \\ \uparrow \\ \swarrow \downarrow \\ 1 \quad \bar{1} \end{array} ; & \hat{d} = \begin{array}{c} 1 \\ \uparrow \\ \swarrow \downarrow \\ \bar{1} \quad 0 \end{array} \\
 \hat{\bar{r}} = \begin{array}{c} \bar{1} \\ \uparrow \\ \swarrow \downarrow \\ 1 \quad 0 \end{array} ; & \hat{\bar{u}} = \begin{array}{c} \bar{1} \\ \uparrow \\ \swarrow \downarrow \\ \bar{1} \quad 1 \end{array} ; & \hat{\bar{d}} = \begin{array}{c} \bar{1} \\ \uparrow \\ \swarrow \downarrow \\ 0 \quad \bar{1} \end{array}
 \end{array} \Bigg| = \text{base de } \hat{H} . \quad (1.75)$$

Cette notation peut paraître peu intuitive, mais elle faciliterai la lecture des doubles triangles une fois définies. Pour l'identifier avec les chemins élémentaires  $r$ ,  $u$  et  $d$  il suffit de lire les diagrammes dans le sens inverse des flèches.

Ces deux bases étant duales nous avons l'action de  $\hat{H}$  sur  $H$  donne par définition comme  $\langle i \xrightarrow{k} j | i' \xrightarrow{k'} j' \rangle = \delta_{ii'} \delta_{jj'} \delta_{kk'}$ . Ce qui correspond de manière naturelle au collage suivante des triangles de chaque espace :

$$\begin{array}{c} k \\ \uparrow \\ \swarrow \downarrow \\ i \quad j \\ \swarrow \downarrow \\ i' \quad j' \\ \downarrow \\ k' \end{array} = \langle i \xrightarrow{k} j | i' \xrightarrow{k'} j' \rangle = \delta_{ii'} \delta_{jj'} \delta_{kk'} \quad (1.76)$$

**L'algèbre**  $(\mathcal{B}, \circ)$  Nous allons maintenant construire l'espace vectoriel de doubles triangles  $\mathcal{B} \cong H \otimes \hat{H}$ . Il est engendré par la collection de doubles triangles  $|i \xrightarrow{k} j\rangle \langle i' \xrightarrow{k} j'|$ , représenté par des diagramme collés par l'arête donnant la longueur  $k$ .  $\mathcal{B}$  est un espace vectoriel gradue par  $k$ , il peut être écrit comme somme des sous-espaces de longueur fixe

$$\mathcal{B} = \mathcal{B}_0 \oplus \mathcal{B}_1 \oplus \mathcal{B}_{\bar{1}}$$

ou chaque sous espace est composé des doubles triangles. La base de  $\mathcal{B}$  á la représentation diagrammatique suivante :

(1.77)

L'action de  $\widehat{H}$  que nous venons de définir plus haut, muni  $H$  d'un produit scalaire qui permet d'identifier  $H$  avec son dual  $\widehat{H}$ . Alors  $\mathcal{B}$  est identifié avec l'espace

$$H_0 \otimes H_0 \oplus H_1 \otimes H_1 \oplus H_{\bar{1}} \otimes H_{\bar{1}}.$$

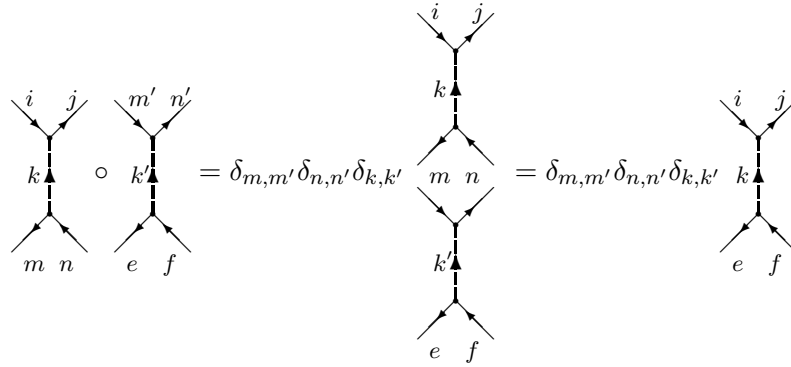
La base de  $\mathcal{B}$  peut alors être noté de manière compacte comme suit :

$$\mathcal{B}_0 = \{00, 01, 0\bar{1}, 10, 11, 1\bar{1}, \bar{1}0, \bar{1}\bar{1}, \bar{1}\bar{1}\},$$

$$\mathcal{B}_1 = \{rr, ru, rd, ur, uu, ud, dr, du, dd\},$$

$$\mathcal{B}_{\bar{1}} = \{\bar{d}\bar{d}, \bar{d}\bar{r}, \bar{d}\bar{u}, \bar{r}\bar{d}, \bar{r}\bar{r}, \bar{r}\bar{u}, \bar{u}\bar{d}, \bar{u}\bar{r}, \bar{u}\bar{u}\}.$$

L'espace vectoriel  $\mathcal{B}$  est muni de la structure d'algèbre définie par un produit associatif que nous appellerons **produit vertical** et qui est définie de la même manière que pour  $SU(2)$ . Notons tout de même que l'orientation des diagrammes, en particulier les diagrammes de l'espace dual  $H$  à été choisi de manière que il soit naturel le colage vertical de doubles triangles.



A partir de cette définition de la multiplication il est évident que le produit des éléments de la base qui n'ont pas la même longueur est égale à zéro. En nous servant de cette propriété nous avons choisi de présenter la table de multiplication de la base de  $\mathcal{B}$  par blocs, en considérant uniquement les blocs non-nuls :

$\mathcal{B}_0 \circ \mathcal{B}_0$	00	01	$0\bar{1}$	10	11	$1\bar{1}$	$\bar{1}0$	$\bar{1}1$	$\bar{1}\bar{1}$
$\boxed{00}$	00	01	$0\bar{1}$	.	.	.	.	.	.
01	.	.	.	00	01	$0\bar{1}$	.	.	.
$0\bar{1}$	.	.	.	.	.	.	00	01	$0\bar{1}$
10	10	11	$1\bar{1}$	.	.	.	.	.	.
$\boxed{11}$	.	.	.	10	11	$1\bar{1}$	.	.	.
$1\bar{1}$	.	.	.	.	.	.	10	11	$1\bar{1}$
$\bar{1}0$	$\bar{1}0$	$\bar{1}1$	$\bar{1}\bar{1}$	.	.	.	.	.	.
$\bar{1}1$	.	.	.	$\bar{1}0$	$\bar{1}1$	$\bar{1}\bar{1}$	.	.	.
$\boxed{\bar{1}\bar{1}}$	.	.	.	.	.	.	$\bar{1}0$	$\bar{1}1$	$\bar{1}\bar{1}$

=  $M_0$

$\mathcal{B}_1 \circ \mathcal{B}_1$	rr	ru	rd	ur	uu	ud	dr	du	dd
$\boxed{rr}$	rr	ru	rd	.	.	.	.	.	.
ru	.	.	.	rr	ru	rd	.	.	.
rd	.	.	.	.	.	.	rr	ru	rd
ur	ur	uu	ud	.	.	.	.	.	.
$\boxed{uu}$	.	.	.	ur	uu	ud	.	.	.
ud	.	.	.	.	.	.	ur	uu	ud
dr	dr	du	dd	.	.	.	.	.	.
du	.	.	.	dr	du	dd	.	.	.
$\boxed{dd}$	.	.	.	.	.	.	dr	du	dd

=  $M_1$

$\mathcal{B}_{\bar{1}} \circ \mathcal{B}_{\bar{1}}$	$\bar{d}\bar{d}$	$\bar{d}\bar{r}$	$\bar{d}\bar{u}$	$\bar{r}\bar{d}$	$\bar{r}\bar{r}$	$\bar{r}\bar{u}$	$\bar{u}\bar{d}$	$\bar{u}\bar{r}$	$\bar{u}\bar{u}$	
$\boxed{\bar{d}\bar{d}}$	$\bar{d}\bar{d}$	$\bar{d}\bar{r}$	$\bar{d}\bar{u}$	.	.	.	.	.	.	= $M_{\bar{1}}$
$\bar{d}\bar{r}$	.	.	.	$\bar{d}\bar{d}$	$\bar{d}\bar{r}$	$\bar{d}\bar{u}$	.	.	.	
$\bar{d}\bar{u}$	.	.	.	.	.	.	$\bar{d}\bar{d}$	$\bar{d}\bar{r}$	$\bar{d}\bar{u}$	
$\bar{r}\bar{d}$	$\bar{r}\bar{d}$	$\bar{r}\bar{r}$	$\bar{r}\bar{u}$	.	.	.	.	.	.	
$\boxed{\bar{r}\bar{r}}$	.	.	.	$\bar{r}\bar{d}$	$\bar{r}\bar{r}$	$\bar{r}\bar{u}$	.	.	.	
$\bar{r}\bar{u}$	.	.	.	.	.	.	$\bar{r}\bar{d}$	$\bar{r}\bar{r}$	$\bar{r}\bar{u}$	
$\bar{u}\bar{d}$	$\bar{u}\bar{d}$	$\bar{u}\bar{r}$	$\bar{u}\bar{u}$	.	.	.	.	.	.	
$\bar{u}\bar{r}$	.	.	.	$\bar{u}\bar{d}$	$\bar{u}\bar{r}$	$\bar{u}\bar{u}$	.	.	.	
$\boxed{\bar{u}\bar{u}}$	.	.	.	.	.	.	$\bar{u}\bar{d}$	$\bar{u}\bar{r}$	$\bar{u}\bar{u}$	

La table de multiplication de l'algèbre  $(\mathcal{B}, \circ)$  a alors la forme suivante

$$\begin{array}{c|c|c|c}
 \circ & \mathcal{B}_0 & \mathcal{B}_1 & \mathcal{B}_{\bar{1}} \\
 \hline
 \mathcal{B}_0 & M_0 & \cdot & \cdot \\
 \hline
 \mathcal{B}_1 & \cdot & M_1 & \cdot \\
 \hline
 \mathcal{B}_{\bar{1}} & \cdot & \cdot & M_{\bar{1}}
 \end{array}, \tag{1.78}$$

Dans chaque bloc  $M_p$  les éléments qu'on a été dénotés par un cadre sont les composants de l'identité. Comme pour les cas  $SU(2)$  l'identité ne forme par partie de la base de  $\mathcal{B}$  et s'écrit dans cas présent  $\mathbb{1} = 00 + 11 + \bar{1}\bar{1} + rr + uu + dd + \bar{d}\bar{d} + \bar{r}\bar{r} + \bar{u}\bar{u}$ .

**La coalgèbre  $(\mathcal{B}, \Delta)$**  Nous allons définir sur  $\mathcal{B}$  un coproduit compatible avec le produit vertical  $\circ$ . Le coproduit  $\Delta$  munit à l'algèbre  $(\mathcal{B}, \circ)$  d'une structure de bigèbre.

La définition du coproduit sur  $\mathcal{B}$  est moins évidente que celle du produit  $\circ$  (rappelons nous que  $\circ$  est le produit naturel associé aux diagrammes verticaux). Pour  $SU(2)$  la construction du coproduit  $\Delta$  peut se faire a partir de différents méthodes reposant sur la définition des cellules de Ocneanu, les valeurs des cellules basiques et les propriétés de réflexion et unitariété (voir equations  $A_1$  a  $A_7$ ). Mais pour les cas  $SU(3)$  les valeurs des cellules de base ne sont pas calculables à l'aide de formules explicites comme pour  $SU(2)$ , et nous ne savons pas a priori quelles sont les propriétés (équivalents de la unitariété et réflexion) que ces cellules doivent satisfaire. Nous pouvons par contre emmettre une hypothèse pour après vérifier que les cellules ainsi définies donnent lieu à un coproduit bien défini, c'est à dire qui soit bien un homomorphisme. C'est pour ceci que nous décidons de présenter d'abord le coproduit et ses propriétés explicitement. La valeur des cellules associés et ses propriétés sera donnée plus loin.

L'action du coproduit  $\Delta : \mathcal{B} \rightarrow \mathcal{B} \otimes \mathcal{B}$  sur la base 1.77 est à priori définie comme suit :

$$\begin{aligned}
\Delta 00 &= 00 \otimes 00 + rr \otimes \bar{r}\bar{r} + \bar{d}\bar{d} \otimes dd & \Delta rr &= 00 \otimes rr + rr \otimes 11 + \bar{d}\bar{d} \otimes \bar{u}\bar{u} \\
\Delta 01 &= 01 \otimes 01 + ru \otimes \bar{r}\bar{u} + \bar{d}\bar{r} \otimes dr & \Delta ru &= 01 \otimes ru + ru \otimes 1\bar{1} + \bar{d}\bar{r} \otimes \bar{u}\bar{d} \\
\Delta 0\bar{1} &= 0\bar{1} \otimes 0\bar{1} + rd \otimes \bar{r}\bar{d} + \bar{d}\bar{u} \otimes du & \Delta rd &= 0\bar{1} \otimes rd + rd \otimes 10 + \bar{d}\bar{u} \otimes \bar{u}\bar{r} \\
\Delta 10 &= 10 \otimes 10 + ur \otimes \bar{u}\bar{r} + \bar{r}\bar{d} \otimes rd & \Delta ur &= 10 \otimes ur + ur \otimes \bar{1}\bar{1} + \bar{r}\bar{d} \otimes \bar{d}\bar{u} \\
\Delta 11 &= 11 \otimes 11 + uu \otimes \bar{u}\bar{u} + \bar{r}\bar{r} \otimes rr & \Delta uu &= 11 \otimes uu + uu \otimes \bar{1}\bar{1} + \bar{r}\bar{r} \otimes \bar{d}\bar{d} \\
\Delta 1\bar{1} &= 1\bar{1} \otimes 1\bar{1} + ud \otimes \bar{u}\bar{d} + \bar{r}\bar{u} \otimes ru & \Delta ud &= 1\bar{1} \otimes ud + ud \otimes \bar{1}0 + \bar{r}\bar{u} \otimes \bar{d}\bar{r} \\
\Delta \bar{1}0 &= \bar{1}0 \otimes \bar{1}0 + dr \otimes \bar{d}\bar{r} + \bar{u}\bar{d} \otimes ud & \Delta dr &= \bar{1}0 \otimes dr + dr \otimes 01 + \bar{u}\bar{d} \otimes \bar{r}\bar{u} \\
\Delta \bar{1}\bar{1} &= \bar{1}\bar{1} \otimes \bar{1}\bar{1} + du \otimes \bar{d}\bar{u} + \bar{u}\bar{r} \otimes ur & \Delta du &= \bar{1}\bar{1} \otimes du + du \otimes 0\bar{1} + \bar{u}\bar{r} \otimes \bar{r}\bar{d} \\
\Delta \bar{1}\bar{1} &= \bar{1}\bar{1} \otimes \bar{1}\bar{1} + dd \otimes \bar{d}\bar{d} + \bar{u}\bar{u} \otimes uu & \Delta dd &= \bar{1}\bar{1} \otimes dd + dd \otimes 00 + \bar{u}\bar{u} \otimes \bar{r}\bar{r}
\end{aligned} \tag{1.79}$$

$$\begin{aligned}
\Delta \bar{d}\bar{d} &= 00 \otimes \bar{d}\bar{d} + rr \otimes uu + \bar{d}\bar{d} \otimes \bar{1}\bar{1} \\
\Delta \bar{d}\bar{r} &= 01 \otimes \bar{d}\bar{r} + ru \otimes ud + \bar{d}\bar{r} \otimes \bar{1}0 \\
\Delta \bar{d}\bar{u} &= 0\bar{1} \otimes \bar{d}\bar{u} + rd \otimes ur + \bar{d}\bar{u} \otimes \bar{1}\bar{1} \\
\Delta \bar{r}\bar{d} &= 10 \otimes \bar{r}\bar{d} + ur \otimes du + \bar{r}\bar{d} \otimes 0\bar{1} \\
\Delta \bar{r}\bar{r} &= 11 \otimes \bar{r}\bar{r} + uu \otimes dd + \bar{r}\bar{r} \otimes 00 \\
\Delta \bar{r}\bar{u} &= 1\bar{1} \otimes \bar{r}\bar{u} + ud \otimes dr + \bar{r}\bar{u} \otimes 01 \\
\Delta \bar{u}\bar{d} &= \bar{1}0 \otimes \bar{u}\bar{d} + dr \otimes ru + \bar{u}\bar{d} \otimes 1\bar{1} \\
\Delta \bar{u}\bar{r} &= \bar{1}\bar{1} \otimes \bar{u}\bar{r} + du \otimes rd + \bar{u}\bar{r} \otimes 10 \\
\Delta \bar{u}\bar{u} &= \bar{1}\bar{1} \otimes \bar{u}\bar{u} + dd \otimes rr + \bar{u}\bar{u} \otimes 11
\end{aligned}$$

Une observation est que tous les coefficients dans ce coproduit sont égaux à 1, et que dans chaque cas le coproduit contient tous les termes qui peuvent à priori intervenir par des raisons de concaténation.  $\Delta$  est compatible avec la structure de l'algèbre  $(\mathcal{B}, \circ)$ , c'est à dire l'application  $\Delta$  est un homomorphisme entre l'espace  $\mathcal{B}$  et sont carrée tensoriel. Pour le vérifier nous considérons la multiplication naturelle dans le espace produit tensoriel, celle-ci est définie comme  $(i \otimes j) \circ (m \otimes n) = (i \circ m) \otimes (j \circ n)$ , la compatibilité du coproduit  $\Delta$  avec cette multiplication implique que

$$\Delta(i \circ j) = \Delta i \circ \Delta j$$

Cette propriété est vérifié pour chaque une des entrées de la table de multiplication (1.78), montrer ces calculs explicitement possède un intérêt limité et occuperait une grade place puisque la table es de dimension  $27 \times 27$ . Nous allons montrer seulement quelques exemples à titre d'illustration :

$$- \underline{01 \circ 10 = 00} \Rightarrow$$

$$\Delta(01 \circ 10) = 00 \otimes 00 + rr \otimes \bar{r}\bar{r} + \bar{d}\bar{d} \oplus dd$$

$$\begin{aligned} \Delta 01 \circ \Delta 10 &= (01 \otimes 01 + ru \otimes \bar{r}\bar{u} + \bar{d}\bar{r} \otimes dr) \circ (10 \otimes 10 + ur \otimes \bar{u}\bar{r} + \bar{r}\bar{d} \otimes rd) \\ &= 01 \circ 10 \otimes 01 \circ 10 + ru \circ ur \otimes \bar{r}\bar{u} \circ \bar{u}\bar{r} + \bar{d}\bar{r} \circ \bar{r}\bar{d} \otimes dr \circ rd \\ &= 00 \otimes 00 + rr \otimes \bar{r}\bar{r} + \bar{d}\bar{d} \oplus dd \end{aligned}$$

$$- \underline{ru \circ ur = rr} \Rightarrow$$

$$\Delta(ru \circ ur) = 00 \otimes rr + rr \otimes 11 + \bar{d}\bar{d} \otimes \bar{u}\bar{u}$$

$$\begin{aligned} \Delta ru \circ \Delta ur &= (01 \otimes ru + ru \otimes 1\bar{1} + \bar{d}\bar{r} \otimes \bar{u}\bar{d}) \circ (10 \otimes ur + ur \otimes \bar{1}\bar{1} + \bar{r}\bar{d} \otimes \bar{d}\bar{u}) \\ &= 01 \circ 10 \otimes ru \circ ur + ru \circ ur \otimes 1\bar{1} \circ \bar{1}\bar{1} + \bar{d}\bar{r} \circ \bar{r}\bar{d} \otimes \bar{u}\bar{d} \circ \bar{d}\bar{u} \\ &= 00 \otimes rr + rr \otimes 11 + \bar{d}\bar{d} \otimes \bar{u}\bar{u} \end{aligned}$$

$$- \underline{\bar{r}\bar{u} \circ \bar{u}\bar{d} = \bar{r}\bar{d}} \Rightarrow$$

$$\Delta(\bar{r}\bar{u} \circ \bar{u}\bar{d}) = 10 \otimes \bar{r}\bar{d} + ur \otimes du + \bar{r}\bar{d} \otimes 0\bar{1}$$

$$\begin{aligned} \Delta \bar{r}\bar{u} \circ \Delta \bar{u}\bar{d} &= (1\bar{1} \otimes \bar{r}\bar{u} + ud \otimes dr + \bar{r}\bar{u} \otimes 01) \circ (\bar{1}0 \otimes \bar{u}\bar{d} + dr \otimes ru + \bar{u}\bar{d} \otimes 1\bar{1}) \\ &= 1\bar{1} \circ \bar{1}0 \otimes \bar{r}\bar{u} \circ \bar{u}\bar{d} + ud \circ dr \otimes dr \circ ru + \bar{r}\bar{u} \circ \bar{u}\bar{d} \otimes 01 \circ 1\bar{1} \\ &= 10 \otimes \bar{r}\bar{d} + ur \otimes du + \bar{r}\bar{d} \otimes 0\bar{1}, \end{aligned}$$

Nous pouvons verifier ces calculs pour chaque élément de la base de  $\mathcal{B}$ , la conclusion est que l'application  $\Delta$  ainsi défini est un coproduit. Nous pouvons écrire explicitement le coproduit de l'identité à partir de l'action sur les éléments de la base :

$$\Delta \mathbf{1} = (00+dd+\bar{r}\bar{r}) \otimes (00+rr+\bar{d}\bar{d}) + (rr+11+\bar{u}\bar{u}) \otimes (\bar{r}\bar{r}+11+uu) + (\bar{d}\bar{d}+uu+\bar{1}\bar{1}) \otimes (dd+\bar{u}\bar{u}+\bar{1}\bar{1}).$$

Il est clair que  $\Delta \mathbf{1} \neq \mathbf{1} \otimes \mathbf{1}$  et pour cette raisons  $(\mathcal{B}, \circ, \Delta)$  ne peut pas être une bigèbre au sens usuel. Néanmoins l'action du coproduit sur l'identité peut être écrit sous la forme :

$$\Delta \mathbf{1} = \mathbf{1}_t \otimes \mathbf{1}_s = t_0 \otimes s_0 + t_1 \otimes s_1 + t_{\bar{1}} \otimes s_{\bar{1}},$$

où chaque composante est définie comme suit

$$\begin{aligned} t_0 &= (00 + dd + \bar{r}\bar{r}) & s_0 &= (00 + rr + \bar{d}\bar{d}) \\ t_1 &= (rr + 11 + \bar{u}\bar{u}) & s_1 &= (\bar{r}\bar{r} + 11 + uu) \\ t_{\bar{1}} &= (\bar{d}\bar{d} + uu + \bar{1}\bar{1}) & s_{\bar{1}} &= (dd + \bar{u}\bar{u} + \bar{1}\bar{1}) \end{aligned}$$

ces éléments constituent la base des sous algèbres *source*  $\mathcal{B}_s$  et *target*  $\mathcal{B}_t$  que nous avons défini dans la section 1.3. Une counité peut aussi être définie dans le sens faible, c'est à dire, il ne s'agit pas d'un homomorphisme (contrairement au cas habituel) car l'application est tordue par les éléments qui apparaissent dans le membre de droite de  $\Delta \mathbf{1}$ . On peut alors vérifier qu'on

a bien a faire à une bigèbre unitale faible. Par ailleurs, on peut aussi définir une antipode (nous ne le ferons pas) et la structure finale est celle d'une algèbre de Hopf faible ou grupoïde quantique. il faut prendre en compte dans le diagramme commutatif que le coproduit de la unité est le produit des unités des sous espaces *target* et *itsurce*. La définition de la counite est la suivante :

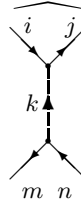
$$\epsilon(e_I) = \begin{cases} 1 & \text{si } e_I \in \mathcal{B}_0 \\ 0 & \text{si } e_I \in \mathcal{B}_1 \text{ ou } \mathcal{B}_2 \end{cases}$$

qui est d'ailleurs en accord avec le résultat obtenu dans les cas  $SU(2)$ .

**L'algèbre dual**  $(\widehat{\mathcal{B}}, \widehat{\circ})$  L'espace dual  $\widehat{\mathcal{B}}$  est engendré par la base duale

$$\begin{aligned} \widehat{\mathcal{B}}_0 &= \{ \widehat{00}, \widehat{01}, \widehat{0\bar{1}}, \widehat{10}, \widehat{11}, \widehat{1\bar{1}}, \widehat{\bar{1}0}, \widehat{\bar{1}1}, \widehat{\bar{1}\bar{1}} \}, \\ \widehat{\mathcal{B}}_1 &= \{ \widehat{r\bar{r}}, \widehat{r\bar{u}}, \widehat{r\bar{d}}, \widehat{u\bar{r}}, \widehat{u\bar{u}}, \widehat{u\bar{d}}, \widehat{d\bar{r}}, \widehat{d\bar{u}}, \widehat{d\bar{d}} \}, \\ \widehat{\mathcal{B}}_{\bar{1}} &= \{ \widehat{d\bar{d}}, \widehat{d\bar{r}}, \widehat{d\bar{u}}, \widehat{r\bar{d}}, \widehat{r\bar{r}}, \widehat{r\bar{u}}, \widehat{u\bar{d}}, \widehat{u\bar{r}}, \widehat{u\bar{u}} \}. \end{aligned}$$

cette base est représenté à l'aide des diagrammes verticaux

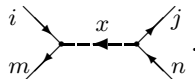


(1.80)

Le coproduit  $\Delta$  défini dans l'espace  $\mathcal{B}$  induit un produit  $\widehat{\circ}$  dans l'espace dual  $\widehat{\mathcal{B}}$ , la table de multiplication est de dimension  $27 \times 27$  et nous n'allons pas l'écrire explicitement ici, d'autant que, comme on le verra, il existe une base (la base horizontal) dans laquelle la définition de ce produit est naturelle. Nous allons simplement montrer trois exemples, pour illustrer de ce produit, mais surtout parce que le résultat va nous servir, plus loin, pour définir la valeur des cellules basiques.

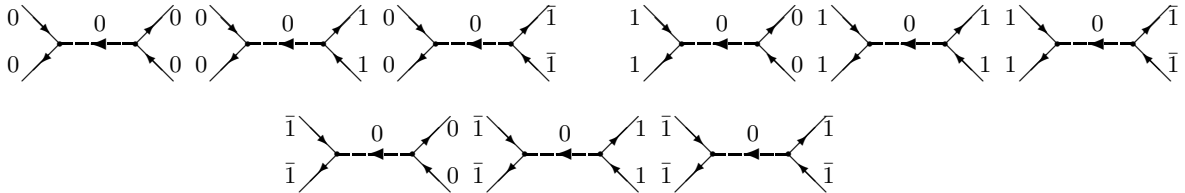
$$\begin{aligned} \langle \widehat{d\bar{r}} \otimes \widehat{r\bar{u}}, \Delta \widehat{u\bar{d}} \rangle &= \langle \widehat{d\bar{r}} \widehat{\circ} \widehat{r\bar{u}}, \widehat{u\bar{d}} \rangle \Rightarrow \widehat{d\bar{r}} \widehat{\circ} \widehat{r\bar{u}} = \widehat{u\bar{d}} \\ \langle \widehat{r\bar{u}} \otimes \widehat{u\bar{d}}, \Delta \widehat{d\bar{r}} \rangle &= \langle \widehat{r\bar{u}} \widehat{\circ} \widehat{u\bar{d}}, \widehat{d\bar{r}} \rangle \Rightarrow \widehat{r\bar{u}} \widehat{\circ} \widehat{u\bar{d}} = \widehat{d\bar{r}} \\ \langle \widehat{u\bar{d}} \otimes \widehat{d\bar{r}}, \Delta \widehat{r\bar{u}} \rangle &= \langle \widehat{u\bar{d}} \widehat{\circ} \widehat{d\bar{r}}, \widehat{r\bar{u}} \rangle \Rightarrow \widehat{u\bar{d}} \widehat{\circ} \widehat{d\bar{r}} = \widehat{r\bar{u}} \end{aligned} \quad (1.81)$$

L'espace dual  $\widehat{\mathcal{B}}$  est engendré par une base différente à la base duale formé de doubles triangles verticaux (diagrammes horizontaux). Cette base horizontal est gradué par une étiquette  $x$  donnant la "longueur" horizontale. La représentation diagrammatique des éléments de cette base est donne par des diagrammes de diffusion horizontaux

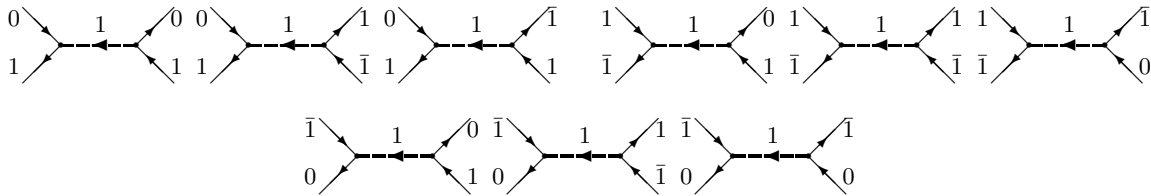


où  $(i, x, m)$  et  $(j, x, n)$  sont des triangles admissibles.  $\widehat{\mathcal{B}}$  est gradué par l'index  $x$ , et se décompose en trois sous-espaces  $\widehat{\mathcal{B}} = \widehat{\mathcal{B}}_0 \oplus \widehat{\mathcal{B}}_1 \oplus \widehat{\mathcal{B}}_{\bar{1}}$ . L'ensemble des éléments de la base horizontale est comme suit :

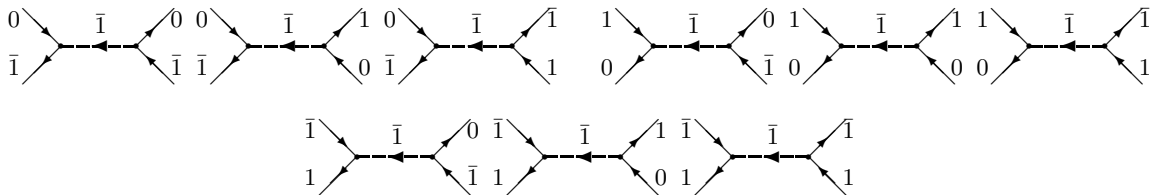
– Base du sous-espace  $\widehat{\mathcal{B}}_0$



– Base du sous-espace  $\widehat{\mathcal{B}}_1$



– Base du sous-espace  $\widehat{\mathcal{B}}_{\bar{1}}$



Dans cette base le produit  $\hat{\circ}$  (induit par le coproduit  $\Delta$ ) peut-être exprimé de manière naturelle comme la contraction horizontale des éléments de la base horizontale.

$$\begin{array}{c} i \\ \diagdown \\ \text{---} \\ \diagup \\ m \end{array} \begin{array}{c} x \\ \diagup \\ \text{---} \\ \diagdown \\ n \end{array} \hat{\circ} \begin{array}{c} m' \\ \diagdown \\ \text{---} \\ \diagup \\ k \end{array} \begin{array}{c} x' \\ \diagup \\ \text{---} \\ \diagdown \\ l \end{array} \begin{array}{c} n' \\ \diagdown \\ \text{---} \\ \diagup \\ \end{array} = \delta_{m,m'} \delta_{n,n'} \delta_{x,x'} \begin{array}{c} i \\ \diagdown \\ \text{---} \\ \diagup \\ \end{array} \begin{array}{c} x \\ \diagup \\ \text{---} \\ \diagdown \\ \end{array} \begin{array}{c} j \\ \diagdown \\ \text{---} \\ \diagup \\ \end{array} \quad (1.82)$$

Cette multiplication fait de l'espace dual  $\mathcal{B}$  une algèbre associative. Pour obtenir la multiplication de l'équation (1.81) nous avons besoin de faire exprimer les éléments de la base dual en termes de la base horizontale, dans notre approximation la comparaison du produit de l'équation (1.82) et celle de l'équation (1.81) permettra de fixer la valeur des cellules de base.

**Changement de base** Nous appelons les coefficients donnant le changement de base entre la base duale et la base horizontale  $F \left\{ \begin{smallmatrix} i & k & j \\ m & x & n \end{smallmatrix} \right\}$ . La notation suit celle choisie pour le cas  $SU(2)$  mais nous choisissons de supprimer le sous-index de  $F$  puisque notre étude  $SU(3)$  se limite uniquement au cas  $\mathcal{A}$ , et pour ces cas tous les coefficients  $F_i$  sont les mêmes. Le changement de base dans l'espace dual  $\widehat{\mathcal{B}}$  est donné par



graphes de type  $A$ . D'égal manière nous ne connaissons pas à priori les équivalents des propriétés d'unitarité et de réflexion des cellules de  $SU(2)$ , il est d'ailleurs probable qu'en général les propriétés d'unitarité et réflexion soient différentes dans le cas  $SU(3)$ , car la prise en compte de l'orientation des arêtes implique que les symétries tétraédriques (valables pour le cas  $SU(2)$ ) ne sont plus valables.

Les cellules que nous venons de définir ont garde une propriété utile, qu'on peut vérifier explicitement dans ce cas, c'est la construction des cellules générales á partir du collage des cellules basiques. Il est en effet possible de construire chaque cellule en termes de une (et dans se cas simple, une seule) combinaison des trois cellules basiques de la équation (1.83), la construction est directe et ici nous nous contentons de montrer deux exemples pour illustrer le calcul. Nous avons choisi trois cellules de longueur horizontale 0 et longueur verticale  $\bar{1}$ , et trois cellules de longueur horizontale  $\bar{1}$  et longueur verticale 1 :

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{c} \begin{array}{|c|c|} \hline \rightarrow 1 & \rightarrow 1 \\ \hline \downarrow & \downarrow \\ \hline \leftarrow 0 & \leftarrow 0 \\ \hline \end{array} = \bar{1} \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \rightarrow 1 & \rightarrow \bar{1} & \rightarrow 0 & \rightarrow 1 \\ \hline \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \hline \leftarrow 0 & \leftarrow 1 & \leftarrow \bar{1} & \leftarrow 0 \\ \hline \end{array} ; \begin{array}{c} \begin{array}{|c|c|} \hline \rightarrow 0 & \rightarrow \bar{1} \\ \hline \downarrow & \downarrow \\ \hline \leftarrow 1 & \leftarrow 0 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{c} \begin{array}{|c|c|c|} \hline \rightarrow 0 & \rightarrow 1 & \rightarrow \bar{1} \\ \hline \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \hline \leftarrow 1 & \leftarrow \bar{1} & \leftarrow 0 \\ \hline \end{array} \\ \end{array} \\
 \\
 \begin{array}{c} \begin{array}{|c|c|} \hline \rightarrow \bar{1} & \rightarrow \bar{1} \\ \hline \downarrow & \downarrow \\ \hline \leftarrow 1 & \leftarrow 1 \\ \hline \end{array} = 0 \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \rightarrow \bar{1} & \rightarrow 0 & \rightarrow 1 & \rightarrow \bar{1} \\ \hline \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \hline \leftarrow 1 & \leftarrow \bar{1} & \leftarrow 0 & \leftarrow 1 \\ \hline \end{array} ; \begin{array}{c} \begin{array}{|c|c|} \hline \rightarrow 1 & \rightarrow 0 \\ \hline \downarrow & \downarrow \\ \hline \leftarrow \bar{1} & \leftarrow 1 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{c} \begin{array}{|c|c|c|} \hline \rightarrow 1 & \rightarrow \bar{1} & \rightarrow 0 \\ \hline \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \hline \leftarrow \bar{1} & \leftarrow 0 & \leftarrow 1 \\ \hline \end{array} \\ \end{array} \\
 \\
 \begin{array}{c} \begin{array}{|c|c|} \hline \rightarrow 0 & \rightarrow 0 \\ \hline \downarrow & \downarrow \\ \hline \leftarrow \bar{1} & \leftarrow \bar{1} \\ \hline \end{array} = 1 \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \rightarrow 0 & \rightarrow 1 & \rightarrow \bar{1} & \rightarrow 0 \\ \hline \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \hline \leftarrow \bar{1} & \leftarrow \bar{1} & \leftarrow 0 & \leftarrow 1 \\ \hline \end{array} ; \begin{array}{c} \begin{array}{|c|c|} \hline \rightarrow \bar{1} & \rightarrow 1 \\ \hline \downarrow & \downarrow \\ \hline \leftarrow 0 & \leftarrow \bar{1} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{c} \begin{array}{|c|c|c|} \hline \rightarrow \bar{1} & \rightarrow 0 & \rightarrow 1 \\ \hline \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \hline \leftarrow 0 & \leftarrow 1 & \leftarrow \bar{1} \\ \hline \end{array} \\ \end{array}
 \end{array}
 \end{array} \tag{1.84}$$

Il y a un total de 24 cellules que peuvent être construites directement à partir du changement de base entre la base horizontale et la base verticale, ou au travers du collage des cellules que nous venons de illustrer.



## Chapitre 2

# La méthode de scission modulaire.

Dans ce chapitre nous présentons la méthode de **scission modulaire**<sup>1</sup> qui permet d'obtenir, à partir d'un invariant modulaire donnée, l'ensemble des matrices toriques, le graphe d'Ocneanu et une réalisation matricielle de l'algèbre des symétries quantiques, sans avoir besoin de construire explicitement le groupoïde  $\mathcal{B}$ .

Ces résultats permettent, dans la plupart des cas de déterminer explicitement l'algèbre  $Oc(G)$  et le graphe de Coxeter  $G$  associé à un invariant modulaire. Dans cette approche le graphe  $G$  n'est pas considéré comme une donnée de départ, mais fait partie des résultats obtenus par l'application de la méthode.

La méthode permet d'explorer le problème des symétries quantiques des invariants modulaires de haut niveaux, nous allons présenter dans la section 2.4 de ce chapitre la solution explicite des cas  $\mathcal{E}_5^*$ ,  $\mathcal{E}_9$  et  $\mathcal{E}_9/\mathbb{Z}_3$  du système  $SU(3)$ . Les deux dernier graphes apparaissent comme sous graphes du même graphe d'Ocneanu. Le cas  $\mathcal{E}_5^*$  est un exemple où le graphe lui-même n'apparaît pas explicitement dans  $Oc(G)$ , mais il peut être déterminé de manière relativement simple en lui demandant de satisfaire à différentes relations de module.

Nous avons déjà remarqué que la liste de graphes participant à la classification des théories conformes de type  $\hat{su}(2)$ ,  $\hat{su}(3)$  et  $\hat{su}(4)$  a été présentée par A. Ocneanu<sup>2</sup> en [59], mais le groupoïde quantique  $\mathcal{B}$  n'a pas été calculé pour ses exemples à cause de la complexité du problème, c'est une méthode équivalente à la méthode de scission modulaire qu'a été utilisé pour déterminer cette liste de graphes [54], mais cette méthode n'est pas disponible dans la littérature.

---

<sup>1</sup>Le contenu du chapitre est constitué par la publication [47]

<sup>2</sup>Les graphes du système  $SU(3)$ , appelés de Di Francesco et Zuber on été proposés empiriquement dans [32], mais la liste a été corrigé et un des graphes a été éliminé à partir des résultats de [59]

## 2.1 Introduction

Following the works of [18], it was shown that to every modular invariant of a 2d CFT one can associate a special kind of quantum groupoid  $\mathcal{B}(G)$ , constructed from the combinatorial and modular data [13] of a graph  $G$  [23, 7, 25, 27, 10]. This quantum groupoid  $\mathcal{B}(G)$  plays a central role in the classification of 2d CFT, since it also encodes information on the theory when considered in various environments (not only on the bulk but also with boundary conditions and defect lines): the corresponding generalized partition functions are expressed in terms of a set of non-negative integer coefficients that can be determined from associative properties of structural maps of  $\mathcal{B}(G)$  [28, 24, 25]. A series of papers [4, 23, 5, 6, 25] present the computations allowing to obtain these coefficients from a general study of the graph  $G$  and its quantum symmetries. In this approach, the set of graphs  $G$  is taken as an input. For the  $\widehat{su}(2)_k$  model, the graphs  $G$  are the ADE Dynkin diagram, and for the  $\widehat{su}(3)_k$  the Di Francesco-Zuber diagrams. A list of graphs has also been proposed in [20] for the  $\widehat{su}(4)_k$  model. For a general  $SU(N)$  system, the set of graphs  $G$  presents the following pattern. There is always the infinite series of  $\mathcal{A}_k$  graphs, which are the truncated Weyl alcoves at some level  $k$  of  $SU(N)$  irreps. Other infinite series are obtained by orbifolding and conjugation methods, but there are also some exceptional graphs (generalizing the  $E_6$  and  $E_8$  diagrams of the  $SU(2)$  series), that can not be obtained in that way (to some extent, the  $E_7$  diagram can be obtained from a careful study of the  $D_{10}$  case). One of the purposes of this article is actually to present a method to obtain these graphs.

We start with a modular invariant of a 2d  $\widehat{su}(n)_k$  CFT as initial data. Classification of modular invariants is only completed for  $n = 2$  and  $3$ , but there exist several algorithms, mostly due to T. Gannon, that allow one to obtain modular invariants up to rather high levels of any affine algebra. By solving the modular splitting equation (to be recalled later), we obtain the coefficients of the generalized partition functions, as well as the quantum symmetries of the graph  $G$ , encoded in the Ocneanu graph  $Oc(G)$ . The graph  $G$  itself is then obtained at this stage as a subgraph or a module graph of its own quantum symmetry graph: it appears as a by-product of the computations.

Notice that the determination of the higher ADE graphs  $G$  by solving the modular splitting equation seems to be the method followed by A. Ocneanu (see [19]) to obtain the lists of  $SU(3)$  and  $SU(4)$  graphs presented in [20], but explicitation of his method was never been made available in the literature. The method that we describe here (that incorporates the solution of the modular splitting equation itself) was briefly presented in [8] for the study of the non simply laced diagram  $F_4$ , and is presented here in more general grounds.

The paper is organized as follows. In section **2** we review some results of CFT in order to fix our notations, and present the basic steps of the method allowing to solve the modular

splitting equation. Section 3 treats with more technical details of the resolution, making the difference between commutativity or non commutativity of the quantum symmetry algebra. In the last section we analyze some examples in order to illustrate the techniques. First we treat the  $E_6$  modular invariant of the  $SU(2)$  family; then two exceptional  $SU(3)$  modular invariants at level 5, labelled by the graphs  $\mathcal{E}_5$  and  $\mathcal{E}_5/3$ . The last example is the level 9 exceptional  $SU(3)$  modular invariant, which is a special case for two reasons. The first one is that it leads to a non-commutative algebra of quantum symmetries. The second reason is that in the first list of  $SU(3)$  graphs proposed in [11], three different graphs were associated to this modular invariant. With the methods presented in this paper, we only find two graphs associated to it, in accordance with the final list of Ocneanu published in [20].

## 2.2 CFT and graphs

Consider a 2d CFT defined on a torus, where the chiral algebra is an affine algebra  $\widehat{su}(n)_k$  at level  $k$ . The modular invariant partition function reads

$$\mathcal{Z} = \sum_{i,j} \chi_i \mathcal{M}_{ij} \overline{\chi_j}, \quad (2.1)$$

where  $\chi_i$  is the character of the element  $i$  of the finite set of integrable representations of  $\widehat{su}(n)_k$ , and where the matrix  $\mathcal{M}$  is called the modular invariant: it commutes with the generators  $\mathcal{S}$  and  $\mathcal{T}$  of the modular group  $PSL(2, \mathbb{Z})$ . The introduction of boundary conditions (labelled by  $a, b$ ), defect lines (labelled by  $x, y$ ) or the combination of both, result in the following generalized partition functions (see [3, 1, 24]):

$$\mathcal{Z}_{a|b} = \sum_i (\mathcal{F}_i)_{ab} \chi_i \quad (2.2)$$

$$\mathcal{Z}_{x|y} = \sum_{i,j} (\mathcal{V}_{ij})_{xy} \chi_i \overline{\chi_j} \quad (2.3)$$

$$\mathcal{Z}_{x|ab} = \sum_i (\mathcal{F}_i S_x)_{ab} \chi_i \quad (2.4)$$

All coefficients appearing in the above expressions express multiplicities of irreducible representations in the Hilbert space of the corresponding theory and are therefore non-negative integers. They are conveniently encoded in a set of matrices: the annular matrices  $F_i$  with coefficients  $(\mathcal{F}_i)_{ab}$ ; the double annular matrices  $V_{ij}$  with coefficients  $(\mathcal{V}_{ij})_{xy}$  and the dual annular matrices  $S_x$  with coefficients  $(S_x)_{ab}$ . The different set of indices run as  $i, j = 0, \dots, d_I - 1$ ;  $a, b = 0, \dots, d_G - 1$  and  $x, y = 0, \dots, d_O - 1$ . The integer  $d_I$  is the number of irreps at the given level  $k$ ;  $d_G$  and  $d_O$  are given in terms of the modular invariant  $\mathcal{M}$  by  $d_G = Tr(\mathcal{M})$  and  $d_O = Tr(\mathcal{M}\mathcal{M}^\dagger)$  (see [21, 2, 12]).

Compatibilities conditions – in the same spirit than those defined by Cardy in [3] for boundary conditions – impose relations on the above coefficients (see [22, 24]). Altogether

they read:

$$\widehat{F}_i F_{i'} = \sum_{i''} \mathcal{N}_{i i'}^{i''} F_{i''} \quad (2.5)$$

$$V_{ij} V_{i' j'} = \sum_{i'' j''} \mathcal{N}_{i i'}^{i''} \mathcal{N}_{j j'}^{j''} V_{i'' j''} \quad (2.6)$$

$$S_x S_y = \sum_z \mathcal{O}_{yx}^z S_z \quad (2.7)$$

$\mathcal{N}_{ij}^k$  are the fusion coefficients describing the tensor product decomposition  $i \star j = \sum_k \mathcal{N}_{ij}^k k$  of representations  $i$  and  $j$  of  $\widehat{su}(n)_k$ . They can be encoded in matrices  $N_i$  called fusion matrices.  $\mathcal{O}_{xy}^z$  are the quantum symmetry coefficients and can be encoded in matrices  $O_x$  called quantum symmetry matrices.

The matrices  $\{F_i, N_i, O_x, V_{ij}, S_x\}$  have non negative integer coefficients: they can be seen as the adjacency matrices of a set of graphs. Knowledge of these graphs helps therefore to the complete determination of the different partition functions. All these coefficients also define (or can be obtained by) structural maps of a special kind of quantum groupoid [18, 23, 25, 7, 10]. It is not the purpose of this paper to explore those correspondences, nor to study the mathematical aspects of this quantum groupoid. What we will do here is to determine, taking as initial data the knowledge of the modular invariant  $\mathcal{M}$ , all the coefficients of the above matrices.

### 2.2.1 Steps of the resolution

We start with the double fusion equations (2.6), which are matrix equations involving the double annular matrices  $V_{ij}$ , of size  $d_O \times d_O$ , with coefficients  $(V_{ij})_{xy}$ . Notice that these coefficients can also be encoded in matrices  $W_{xy}$ , of size  $d_I \times d_I$ , with coefficients  $(W_{xy})_{ij} = (V_{ij})_{xy}$ . The  $W_{xy}$  are called double toric matrices. When no defect lines are present ( $x = y = 0$ ), we must recover the modular invariant of the theory, therefore  $W_{00} = \mathcal{M}$ . Using the double toric matrices  $W_{xy}$ , the set of equations (2.6) read:

$$\sum_z (W_{xz})_{ij} W_{zy} = N_i W_{xy} N_j^{tr} . \quad (2.8)$$

The successive steps of resolution are the following:

**Step 1: toric matrices** Setting  $x = y = 0$  in (2.8) and using the fact that  $W_{00} = \mathcal{M}$  we get:

$$\sum_z (W_{0z})_{ij} W_{z0} = N_i \mathcal{M} N_j^{tr} . \quad (2.9)$$

This equation was first presented by A. Ocneanu in [20] and is called the **modular splitting equation**. The r.h.s. of (2.9) involves only known quantities, namely the modular invariant  $\mathcal{M}$  and the fusion matrices  $N_i$ . The l.h.s. involves the set of toric matrices  $W_{z0}$  and  $W_{0z}$ , that we determine from this equation.

**Step 2: double fusion matrices** Setting  $y = 0$  in (2.8) we get:

$$\sum_z (W_{xz})_{ij} W_{z0} = N_i W_{x0} N_j^{tr} \quad (2.10)$$

Once the toric matrices  $W_{x0}$  have been determined from Step 1, the r.h.s. of (2.10) then involves only known quantities. Resolution of these equations determine the double toric matrices  $W_{xy}$  – and equivalently the double fusion matrices  $V_{ij}$  – appearing in the l.h.s. of (2.10).

**Step 3: Ocneanu graph** The double fusion matrices  $V_{ij}$  are generated by a subset of fundamental matrices  $V_{f0}$  and  $V_{0f}$ , where  $f$  stands for the generators of the fusion algebra (for  $SU(n)$  there are  $n-1$  fundamental generators). These matrices are the adjacency matrices of a graph called the Ocneanu graph. Its graph algebra is the quantum symmetry algebra, encoded in the set of matrices  $O_x$ .

**Step 4: higher ADE graph  $G$**  The higher ADE graph  $G$  corresponding to the initial modular invariant  $\mathcal{M}$  is recovered at this stage as a module graph of the Ocneanu graph. It may be a subgraph of  $Oc(G)$  or an orbifold of one of its subgraphs. One also distinguishes type I cases (also called subgroup or self-fusion cases) and type II cases (also called module or non self-fusion cases).

## 2.3 From the modular invariant to graphs

We start with a modular invariant  $\mathcal{M}$  at a given level  $k$  of a  $\widehat{su}(n)$  CFT, and the corresponding fusion matrices  $N_i$ .

### 2.3.1 Determination of toric matrices $W_{x0}$

We compute the set of matrices  $K_{ij}$  defined by:

$$K_{ij} = N_i \mathcal{M} N_j^{tr} . \quad (2.11)$$

The modular splitting equation (2.9) then reads:

$$K_{ij} = \sum_{z=0}^{d_O-1} (W_{0z})_{ij} W_{z0} . \quad (2.12)$$

This equation can be viewed as the linear expansion of the matrix  $K_{ij}$  over the set of toric matrices  $W_{z0}$ , where the coefficients of this expansion are the non-negative integers  $(W_{0z})_{ij}$ . The number  $d_O$  is the dimension of the Ocneanu quantum symmetry algebra, it is evaluated by  $d_O = Tr(\mathcal{M}\mathcal{M}^\dagger)$ . The algebra of quantum symmetries comes with a basis (call its elements  $z$ ) which is special because structure constants of the algebra, in this

basis, are non-negative integers. We introduce the linear map from the space of quantum symmetries to the space of  $d_I \times d_I$  matrices defined by  $z \mapsto W_{z0}$ . This map is not necessarily injective: although elements  $z$  of the quantum symmetries are linearly independent, it may not be so for the toric matrices  $W_{z0}$  (in particular two distinct elements of the quantum symmetries can sometimes be associated with the same toric matrix). Let us call  $r$  the number of linearly independent matrices  $W_{z0}$ . Equation (2.12) tells us that each  $K_{ij}$  (a matrix), defined by (2.11), can be decomposed on the  $r$  dimensional vector space spanned by the vectors (matrices)  $W_{z0}$ .  $r$  can be obtained as follows. From (2.11) we build a matrix  $K$  with elements of the form  $K_{\{ij\},\{i'j'\}}$ , which means that each line of  $K$  is a flattened<sup>3</sup> matrix  $K_{ij}$ . Then  $r$  is obtained as the (line) rank of the matrix  $K$ , since the rank gives precisely the maximal number of independent lines of  $K$ , therefore the number  $r$  of linearly independent matrices  $W_{z0}$ . Two cases are therefore to be considered: depending if toric matrices are all linearly independent (the map  $z \mapsto W_{z0}$  is injective and  $r = d_O$ ) or not ( $r < d_O$ ).

We also introduce a scalar product in the vector space of quantum symmetries for which the  $z$  basis is orthonormal. We consider the squared norm of the element  $\sum_z (W_{0z})_{ij} z$  and denote it  $\|K_{ij}\|^2$ . This is an abuse of notation, “justified” by equation (2.12), and in the same way, we shall often talk, in what follows, of the “squared norm of the matrix  $K_{ij}$ ”, therefore identifying  $z$  with  $W_{z0}$ , although the linear map is not necessarily an isomorphism. We have the following property:

**Propriété 7** *The squared norm of the matrix  $K_{ij}$  is given by:*

$$\|K_{ij}\|^2 = (K_{ij})_{i^*j^*} . \quad (2.13)$$

**Proof:** We have:

$$\begin{aligned} \|K_{ij}\|^2 &= \sum_z |(W_{0z})_{ij}|^2 \\ &= \sum_z (W_{0z})_{ij} (W_{z0})_{i^*j^*} \\ &= (K_{ij})_{i^*j^*} \end{aligned}$$

From the first to the second line we used the following property:

$$(W_{0z})_{ij} = (W_{z0})_{i^*j^*} \quad (2.14)$$

that can be derived from the relation  $V_{i^*j^*} = (V_{ij})^{tr}$ , where  $i^*$  is the conjugated irrep of  $i$  (see [23]). From the second to the third line we use Eq. (2.12) in matrix components. ■

---

<sup>3</sup>By flattened matrix we mean that if  $K_{ij} = \begin{pmatrix} a & \dots & b \\ \dots & \dots & \dots \\ c & \dots & d \end{pmatrix}$ , then the flattened matrix is  $(a \dots b \dots \dots c \dots d)$ .

We now treat the two cases to be considered. Note: an explicit study of all cases seems to indicate that the linear independence (or not) of the toric matrices reflects the commutativity (or not) of the quantum symmetry algebra.

**Non-degenerate case  $r = d_O$ .** This happens when all toric matrices  $W_{z_0}$  are linearly independent. The set of  $K_{ij}$  matrices are calculated from the initial data  $\mathcal{M}$  and  $N_i$  from (2.11). The determination of the toric matrices  $W_{z_0}$  are recursively obtained from a discussion of the squared norm of matrices  $K_{ij}$ , directly obtained from (2.13), which has to be a sum of squared integers.

- Consider the set of linearly independent matrices  $K_{ij}$  of squared norm 1. From (2.12) the solution is that each such matrix is equal to a toric matrix  $W_{z_0}$ .
- Next we consider the set of linearly independent matrices  $K_{ij}$  of squared norm 2. In this case from (2.12) each such matrix is equal to the sum of two toric matrices. We have three cases: (i)  $K_{ij}$  is equal to the sum of two already determined toric matrices (no new information); (ii) it is the sum of an already determined toric matrix and of a new one; (iii) it is equal to the sum of two new toric matrices. To distinguish from cases (ii) and (iii), we calculate the set of differences  $K_{ij} - W_i$  where  $W_i$  runs into the set of determined toric matrices, and check if the obtained matrix has non-negative integer coefficients: in this case we determine a new toric matrix given by  $K_{ij} - W_i$ .
- Next we consider the set of linearly independent matrices  $K_{ij}$  of squared norm 3. From (2.12) each such matrix is equal to the sum of three toric matrices. Either (i)  $K_{ij}$  is equal to the sum of three already determined toric matrices; (ii) it is equal to the sum of a determined toric matrix and of two new ones; (iii) it is equal to the sum of two already determined matrices and a new one; or (iv) it is equal to the sum of three new toric matrices. We calculate the set of differences  $K_{ij} - W_i$  and  $K_{ij} - W_i - W_j$  where  $W_i, W_j$  runs into the set of determined toric matrices, and check whenever the obtained matrix has non-negative integer coefficients.
- For the set of linearly independent matrices  $K_{ij}$  of squared norm 4 there are two possibilities. Either  $K_{ij}$  is the sum of four toric matrices, either it is equal to twice a toric matrix. In the last case, the matrix elements of  $K_{ij}$  should be either 0 or a multiple of 2, and the new toric matrix is obtained as  $K_{ij}/2$ . If not, a similar discussion as the one made for the previous items allows the determination of the new toric matrices.
- The next step is to generalize the previous discussions for higher values of the squared norm, in a straightforward way.

Once the set of toric matrices  $W_{z_0}$  is determined, we can of course use equation (2.9) to check the results.

**Degenerate case  $r < d_O$ .** The integer  $r$  may be strictly smaller than  $d_O$ : this happens when toric matrices  $W_{z_0}$  are *not* linearly independent. In order to better illustrate what has to be done in this case, let us treat a “virtual” example. Suppose the dimension of the Ocneanu algebra is  $d_O = 3$ , and call  $z_1, z_2, z_3$  the basis elements. The corresponding toric matrices are  $W_{z_1}, W_{z_2}, W_{z_3}$ , and suppose they are not linearly independent. For example let us take  $W_{z_3} = W_{z_1} + W_{z_2}$ , in this case we have  $r = 2 < d_O$ . We still use the same scalar product in the algebra of quantum symmetries, and the norm of  $z_3$  is of course 1, but, because of the abuse of language and notation already made before, we shall say that the “squared norm” of  $W_{z_3}$  is equal to 1 (and not 2, of course!). The problem arising from the fact that toric matrices may not be linearly independent, so that the linear expansion (2.12) of  $K_{ij}$  over the family of toric matrices may be not unique, can be solved by considering the squared norm of  $K_{ij}$ . Continuing with our virtual example, we could hesitate between writing  $K_{ij} = W_{z_1} + 2W_{z_2}$  or  $K_{ij} = W_{z_2} + W_{z_3}$ , since  $W_{z_3} = W_{z_1} + W_{z_2}$ . In the first case the corresponding squared norm would be 5, and in the second case it would be 2. In all cases we have met, the knowledge of the squared norm of  $K_{ij}$  from equation (2.13) is sufficient to bypass the ambiguity and obtain the correct linear expansion. The determination of the toric matrices can then be done step by step, in the same way as we did in the non degenerate case, starting from squared norm 1 to higher values. We refer to the  $\widehat{su}(3)$  case at level 9 treated in the next section for more technical details.

### 2.3.2 Determination of double toric matrices $W_{xy}$

Once we have determined the toric matrices  $W_{x_0}$ , we calculate the following set of matrices:

$$K_{ij}^x = N_i W_{x_0} N_j^{tr} \quad (2.15)$$

Then equation (2.10) reads:

$$K_{ij}^x = \sum_z (W_{xz})_{ij} W_{z_0} . \quad (2.16)$$

This equation can be viewed as the linear expansion of the matrix  $K_{ij}^x$  over the set of toric matrices  $W_{z_0}$ , where the coefficients of this expansion are the non-negative integers  $(W_{xz})_{ij}$ , that we want to determine. In the non degenerate case, toric matrices  $W_{z_0}$  are linearly independent, the decomposition (2.16) is unique and the calculation is straightforward. In the degenerate case, some care has to be taken since toric matrices  $W_{z_0}$  are not linearly independent: the expansion (2.16) is therefore not unique. Some coefficients may remain free and one needs further information to a complete determination (see next subsection).

The coefficients  $(W_{xz})_{ij}$  can also be encoded in the double fusion matrices  $V_{ij}$ , that satisfy the double fusion equations (2.6). Setting  $j = j' = 0$ ,  $i = i' = 0$  and  $i' = j = 0$  respectively

in Eq. (2.6) gives:

$$V_{i0} V_{i'0} = \sum_{i''} N_{ii'}^{i''} V_{i''0} , \quad (2.17)$$

$$V_{0j} V_{0j'} = \sum_{j''} N_{jj'}^{j''} V_{0j''} , \quad (2.18)$$

$$V_{ij'} = V_{i0} V_{0j'} = V_{0j'} V_{i0} . \quad (2.19)$$

From Eqs.(2.17) and (2.18), we see that the set of matrices  $V_{i0}$  and  $V_{0i}$  satisfy the fusion algebra. These matrices can therefore be determined using these equations from the subset of matrices  $V_{f0}$  and  $V_{0f}$ , where  $f$  stands for the fundamental generators of the fusion algebra. For  $\widehat{su}(2)$ , there is one generator  $f = 1$ , while for  $\widehat{su}(3)$ , there are two conjugated generators  $(1, 0)$  and  $(0, 1)$ . The determination of double fusion matrices is reduced, by the use of Eqs. (2.17–2.19), to the determination of the generators  $V_{f0}$  and  $V_{0f}$ . It is therefore sufficient to solve Eq. (2.16) only for the pair of indices  $(ij) = (f0)$  and  $(ij) = (0f)$ , and then use Eqs. (2.17–2.19), which simplifies a lot the computational task.

### 2.3.3 Determination of the Ocneanu algebra $O_x$

The matrices  $V_{f0}$  and  $V_{0f}$  are the adjacency matrices of the Ocneanu graph. We denote  $O_{f_L} = V_{f0}$  and  $O_{f_R} = V_{0f}$ , where  $f_L$  and  $f_R$  now stands for the left and right generators of the Ocneanu quantum symmetry algebra. For  $SU(n)$ , there are  $n - 1$  generators  $f$  of the fusion algebra, and therefore  $2(n - 1)$  generators of the quantum symmetry algebra. The Ocneanu graph is also the Cayley graph of multiplication by these generators. From the multiplication by these generators, we can reconstruct the full table of multiplication of the quantum symmetry algebra (with elements denoted  $x, y, z$ )

$$x y = \sum_z \mathcal{O}_{xy}^z z . \quad (2.20)$$

This multiplication table is encoded in the “quantum symmetry matrices”  $O_x$ , which are the graph algebra matrices of the Ocneanu graph, with coefficients  $(O_x)_{yz} = \mathcal{O}_{xy}^z$ . They satisfy the following relations (take care with the order of indices since the quantum symmetry algebra may be non commutative):

$$O_x O_y = \sum_z (O_y)_{xz} O_z . \quad (2.21)$$

Once the generators  $O_{f_L} = V_{f0}$  and  $O_{f_R} = V_{0f}$  have been determined from the previous step, all quantum symmetry matrices can be computed from (2.21).

In the degenerate case the determination of the double toric matrices  $W_{xy}$  from equation (2.16) is not straightforward, some coefficients being still free. A solution to this problem is provided by an analysis of the structure of the Ocneanu graph itself, since it must satisfy some conjugation and chiral conjugation properties (we refer to the level 9  $\widehat{su}(3)$  example

treated in the next section for further details). Further compatibility conditions have also to be satisfied and can be used to check the results, or to determine the remaining coefficients (for degenerate cases). One of these conditions read [9]:

$$O_x V_{ij} = V_{ij} O_x = \sum_z (V_{ij})_{xz} O_z . \quad (2.22)$$

A special case of this equation, for  $x = 0$ , being:

$$W_{yy'} = \sum_z (O_z)_{yy'} W_{0z} . \quad (2.23)$$

### 2.3.4 Determination of the higher ADE graph $G$

For any  $\widehat{su}(n)$  at level  $k$ , we can always consider the infinite series of  $\mathcal{A}_k$  graphs, which are the truncated Weyl alcoves at level  $k$  of  $SU(n)$  irreps. Other infinite series are obtained by orbifolding ( $\mathcal{D}_k = \mathcal{A}_k/p$ ) and conjugation ( $\mathcal{A}_k^*, \mathcal{D}_k^*$ ) methods, but there are also some exceptional graphs that can not be obtained in that way. Even after using the fact that graphs have to obey a list of requirements (such as conjugation, N-ality, spectral properties and that  $G$  must be an  $\mathcal{A}_k$  module) listed in [11], one needed to use some good “computer aided flair” to find them. In this “historical approach”, the problem of determining the algebra of quantum symmetries  $Oc(G)$  was not addressed and this algebra was even less used as a tool to determine  $G$  itself. The procedure described here is different. Starting from the modular invariant, one solves the modular splitting equations (as explained in the previous section) and determines directly the algebra of quantum symmetries  $Oc(G)$ , without knowing what  $G$  itself can be. Then one uses the fact that  $G$  should be *both* an  $\mathcal{A}_k$  module *and* an  $Oc(G)$  module (see comments in [9]). Denoting  $i$  an element of the fusion algebra, the first module property reads  $ia = \sum_b (F_i)_{ab} b$ , with coefficients encoded by the annular matrices  $F_i$ . The associativity property  $(ia)b = i(ab)$  imposes the annular matrices to satisfy the fusion algebra (see Eq.(2.5)). Denoting  $x$  an element of the quantum symmetry algebra, the second module property reads  $xa = \sum_b (S_x)_{ab} b$ , with coefficients encoded by the dual annular matrices  $S_x$ . The associativity property  $(xa)b = x(ab)$  imposes the dual annular matrices to satisfy the quantum symmetry algebra (see Eq.(2.7)). In some simple cases,  $G$  itself appears as a subgraph of the Ocneanu graph, in other cases it appears as a module over the algebra of a particular subgraph. The methods we have described allow for the determination of the graph  $G$  even when orbifold and conjugation arguments from the  $\mathcal{A}_k$  graphs do not apply (the exceptional cases). It can be used for a general affine algebra  $\widehat{g}_k$  at any given level  $k$ , once the corresponding modular invariant is known.

In the next section, we present and illustrate this method by using several exceptional examples. In the  $su(3)$  family, there are three exceptional graphs with self fusion. They are called  $\mathcal{E}_5, \mathcal{E}_9$  and  $\mathcal{E}_{21}$ . In this paper we have chosen  $\mathcal{E}_5$  (a kind of generalization of the

$E_6$  case of  $su(2)$ , also treated as a standard example) and  $\mathcal{E}_9$ . The case of  $\mathcal{E}_{21}$  (a kind of generalization of the  $E_8$  case of  $su(2)$ ) is actually very simple to discuss, even simpler than  $\mathcal{E}_5$  because it does not admit any non trivial module graph, and we could have described it as well, along the same lines. Results concerning  $\mathcal{E}_{21}$  and its quantum symmetries can be found in [6, 25] (in those references, the graph itself is a priori given). The  $su(3)$  - analogue of the  $E_7$  case of  $su(2)$ , which is an exceptional twist of  $\mathcal{D}_9$ , can also be analysed thanks to the modular splitting formula, of course, but the discussion is quite involved (see [16, 15]). We refer to [26] for a description of an  $\widehat{su}(4)$  example. In [8], these methods were applied to a non simply-laced example of the  $su(2)$  family, where the initial partition function is not modular invariant (it is invariant under a particular congruence subgroup) and where there is no associated quantum groupoid.

### 2.3.5 Comments

All module, associativity and compatibility conditions described here between the different set of matrices follow from properties of the quantum groupoid  $\mathcal{B}(G)$  constructed from the higher ADE graph  $G$  [18, 23, 25]. General results have been published on this quantum groupoid (see [18, 7, 10, 17, 21]). But we are not aware of any definite list of properties that the graphs  $G$  should satisfy to obtain the right classification. The strategy adopted here is to take as granted the existence of a quantum groupoid and its corresponding set of properties, and to derive the graph  $G$  as a by-product of the calculations, starting from the only knowledge of the modular invariant. Notice that this seems to be the method adopted by Ocneanu in order to produce his list of  $SU(3)$  and  $SU(4)$  graphs presented in [20]. One crucial check for the existence of the underlying quantum groupoid is the existence of dimensional rules:

$$\dim(\mathcal{B}(G)) = \sum_i d_i^2 = \sum_x d_x^2, \quad (2.24)$$

where the dimensions  $d_i$  and  $d_x$  are calculated from the annular and dual annular matrices:  $d_i = \sum_{a,b} (F_i)_{ab}$ ,  $d_x = \sum_{a,b} (S_x)_{ab}$ .

The method described in this article allows for the determination of the set of matrices  $\{F_i, N_i, O_x, V_{ij}, S_x\}$  and the corresponding graphs. Once the ADE Coxeter graph  $G$  has been obtained, and following the works of [4, 5, 25], we can also propose a realization of its quantum symmetry algebra as a particular tensor product of graph algebras. With this realization at hand, the matrices  $O_x$  and  $S_x$  can be expressed in a much more economic way.

## 2.4 Examples

### 2.4.1 The $E_6$ case of $\widehat{su}(2)$

We start with the  $\widehat{su}(2)_{10}$  modular invariant partition function:

$$\mathcal{Z} = |\chi_0 + \chi_6|^2 + |\chi_3 + \chi_7|^2 + |\chi_4 + \chi_{10}|^2, \quad (2.25)$$

where  $\chi_i$ 's are the characters of  $\widehat{su}(2)_{10}$  with  $0 \leq i \leq 10$ . The total number of irreps is  $d_{\mathcal{A}} = 11$ . The modular invariant matrix  $\mathcal{M}$  is read from  $\mathcal{Z}$  when the later is written  $\mathcal{Z} = \sum_i \chi_i \mathcal{M}_{ij} \bar{\chi}_j$ . The fusion matrices are given by the truncated recurrence formulae of SU(2) irreps at level  $k = 10$ :

$$N_0 = \mathbf{1}_{11} \quad ; \quad N_1 = Ad(\mathcal{A}_{10}) \quad ; \quad N_{i+1} = N_i \cdot N_1 - N_{i-1} \quad (2.26)$$

where  $Ad(\mathcal{A}_{10})$  is the adjacency matrix of the graph  $\mathcal{A}_{10}$  which is the truncated Weyl alcove of SU(2) irreps at level  $k = 10$  (usually called the Dynkin diagram  $A_{11}$ ).

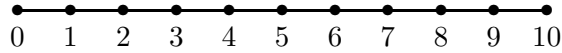


Figure 2.1: The  $\mathcal{A}_{10} = A_{11}$  graph.

**Determination of toric matrices  $W_z$ .** Here we repeat the discussion given in [8]. We have  $Tr(\mathcal{M}\mathcal{M}^\dagger) = 12$  which gives the dimension of the algebra of quantum symmetries  $d_{\mathcal{O}} = 12$ . From the knowledge of  $\mathcal{M}$  and the fusion matrices  $N_i$  we determine all matrices  $K_{ij} = N_i \mathcal{M} N_j^{tr}$ . We calculate the rank of this family and find  $r = 12$ . Since  $r = d_0$ , the toric matrices  $W_{x0}$  are linearly independent and form a special basis of this vector space. For each matrix  $K_{ij}$  we look at their squared norm given by  $\|K_{ij}\|^2 = (K_{ij})_{ij}$  (conjugation is trivial for SU(2) systems,  $i^* = i$ ).

- For squared norm 1 we have 11 linearly independent matrices  $K_{ij}$ , for example

$$K_{0,0} \quad K_{0,1} \quad K_{0,2} \quad K_{0,9} \quad K_{0,10} \quad K_{1,0} \quad K_{1,1} \quad K_{1,2} \quad K_{1,9} \quad K_{1,10} \quad K_{2,0}. \quad (2.27)$$

Each of these matrices define a toric matrix  $W_x = W_{x0}$ , so we get 11 out of the 12 toric matrices.

- For squared norm 2 we have 19 linearly independent matrices  $K_{ij}$ , for example

$$\begin{array}{cccccccccccc} K_{0,3} & K_{0,4} & K_{0,5} & K_{0,6} & K_{0,7} & K_{1,3} & K_{1,4} & K_{1,5} & K_{1,6} & K_{1,7} & & \\ K_{3,0} & K_{3,1} & K_{3,9} & K_{3,10} & K_{4,0} & K_{4,1} & K_{4,9} & K_{4,10} & K_{5,0} & & & \end{array} \quad (2.28)$$

In this list there are four matrices which are not equal to the sum of two already determined toric matrices, one of them being for instance  $K_{0,3}$ . They are therefore equal

to the sum of an already determined toric matrix and the last one to be determined. We build the set of matrices  $K_{0,3} - W_x$ , where  $W_x$  runs in the list of determined toric matrices, and search for those which have non-negative integer coefficients. There is only one solution (namely  $W_x = K_{1,9}$ ), and we get the last toric matrix as  $K_{0,3} - K_{1,9}$ .

- We have therefore determined the set of 12 toric matrices  $W_x$ , with  $0 \leq x \leq 11$  and we can check our result by an explicit verification of the modular splitting equation (2.9).

**Determination of  $V_{ij}$**  Having determined the set of toric matrices  $W_x$ , we compute the set of matrices  $K_{ij}^x = N_i W_x N_j^{tr}$ . For  $SU(2)$ , all double fusion matrices  $V_{ij}$  are generated by the two fundamental matrices  $V_{10}$  and  $V_{01}$ . It is therefore sufficient to calculate the decomposition of  $K_{10}^x$  and  $K_{01}^x$  on the set of toric matrices from Eq.(2.16) to determine  $V_{10}$  and  $V_{01}$ . The calculation is straightforward, and choosing a special ordering in the set of indices  $x$  the resulting matrices are given by

$$V_{10} = \begin{pmatrix} \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{pmatrix} \quad V_{01} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & 1 \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{pmatrix}$$

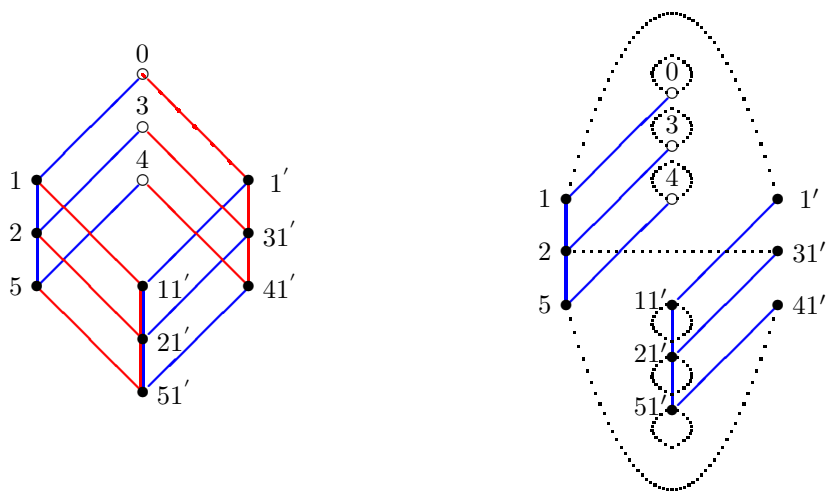


Figure 2.2: The  $E_6$  Ocneanu graph displayed in two alternative ways.

**The Ocneanu graph of quantum symmetries** The two matrices  $V_{10}$  and  $V_{01}$  are the adjacency matrices of the graph of quantum symmetries (Ocneanu graph) associated to the

initial modular invariant. The graph is displayed in figure 2.2, where the ordering for the labels<sup>4</sup> of the set of indices  $x$  is  $\{0, 1, 2, 5, 4, 3, 1', 11', 21', 51', 41', 31'\}$ .  $O_1 = V_{10}$  is associated to the vertex 1 and encodes the multiplication by this vertex; the corresponding lines are displayed in blue.  $O_{1'} = V_{01}$  is associated to the vertex  $1'$  and encodes the multiplication by this vertex; the corresponding lines are displayed in red. Vertices 1 and  $1'$  are called left and right chiral generators. The multiplication can be extended to the whole vector space spanned by the vertices of the Ocneanu graph. We refer to [25] for explicit expressions for the  $O_x$  matrices. There is a chiral conjugation on the graph that permutes the two chiral generators. The chiral operator  $C$  satisfies  $O_{1'} = C^{-1} O_1 C$ . Another way of displaying the Ocneanu graph is to draw only the graph of multiplication by one chiral generator, say 1, and to associate (for example using dashed lines) each vertex with its chiral conjugate. Multiplication of a vertex  $x$  by  $1'$  is obtained as follows: we start with  $x$ , follow the dashed lines to find its chiral conjugate  $y$ , then use the multiplication of  $y$  by 1, and pull-back using the dashed lines to obtain the result. This alternative way of drawing the Ocneanu graph is displayed at the r.h.s. of figure 2.2.

**The Dynkin diagram  $E_6$**  The Ocneanu graph of figure 2.2 is made of two copies of the Dynkin diagram  $E_6$ . One copy, labelled by vertices  $\{0, 1, 2, 5, 4, 3\}$ , is a subalgebra of the quantum symmetry algebra, the other one, labelled by  $\{1', 11', 21', 51', 41', 31'\}$  is only a module. With the method of modular splitting, we see that we find the Dynkin diagram  $E_6$  as a subgraph of the Ocneanu graph. We refer to [4, 25] for expressions of the  $S_x$  matrices. Notice that there is a multiplication defined on the vector space spanned by vertices of the  $E_6$  diagram: one says that it is of subgroup type and that  $E_6$  exists not only as a module (over  $A_{11}$ ) but as a graph algebra. The algebra of quantum symmetries can be realized as the tensor square of the  $E_6$  graph algebra, but the tensor product has to be taken over the subalgebra  $J$  spanned by  $\{0, 3, 4\}$ :  $Oc(E_6) = E_6 \otimes_J E_6$  (for more details see [4, 5, 25]).

### 2.4.2 The $\mathcal{E}_5$ case of $\widehat{su}(3)$

We start with the  $\widehat{su}(3)_5$  modular invariant partition function:

$$\mathcal{Z} = |\chi_{(0,0)}^5 + \chi_{(2,2)}^5|^2 + |\chi_{(0,2)}^5 + \chi_{(3,2)}^5|^2 + |\chi_{(2,0)}^5 + \chi_{(2,3)}^5|^2 \quad (2.29)$$

$$+ |\chi_{(2,1)}^5 + \chi_{(0,5)}^5|^2 + |\chi_{(3,0)}^5 + \chi_{(0,3)}^5|^2 + |\chi_{(1,2)}^5 + \chi_{(5,0)}^5|^2, \quad (2.30)$$

where  $\chi_i^5$ 's are the characters of  $\widehat{su}(3)_5$ , labelled by  $i = (i_1, i_2)$  with  $0 \leq i_1, i_2 \leq 5$ ,  $i_1 + i_2 \leq 5$ . The modular invariant matrix  $\mathcal{M}$  is read from  $\mathcal{Z}$  when the later is written<sup>5</sup>  $\mathcal{Z} = \sum_i \chi_i \mathcal{M}_{ij} \bar{\chi}_j$ . The number of irreps  $i$  is  $d_A = 21$ .  $i$  is also considered as a label taking

<sup>4</sup>We choose the same labelling for the vertices as in [4, 5, 25].

<sup>5</sup>Some authors write instead  $\mathcal{Z} = \sum_i \chi_i \mathcal{M}_{i j^*} \bar{\chi}_j$ , and therefore some care has to be taken in order to compare results since conjugated cases (in particular figures 2.4 and 2.5) must then be interchanged. Here we follow the convention made in [9].

values on the integers  $i \in \{0, 1, 2, \dots, 20\}$ , corresponding to the choice of a certain order on the set of pairs  $(i_1, i_2)$ .  $i = 0 = (0, 0)$  is the trivial representation and there are two fundamental irreps  $(1, 0)$  and  $(0, 1) = (1, 0)^*$ , where  $(i_1, i_2)^* = (i_2, i_1)$  is the conjugated irrep.  $N_{(1,0)}$  is the adjacency matrix of the oriented graph  $\mathcal{A}_5$ , which is the truncated Weyl alcove of  $SU(3)$  irreps at level  $k = 5$  (see figure 2.3). The fusion matrix  $N_{(0,1)}$  is the transposed matrix of  $N_{(1,0)}$  and is the adjacency matrix of the same graph with reversed arrows. Once  $N_{(1,0)}$  is known, the other fusion matrices can be obtained from the **truncated recursion formulae of  $SU(3)$  irreps**, applied for increasing level up to  $k$ :

$$\begin{aligned} N_{(i,j)} &= N_{(1,0)} N_{(i-1,j)} - N_{(i-1,j-1)} - N_{(i-2,j+1)} && \text{if } j \neq 0 \\ N_{(i,0)} &= N_{(1,0)} N_{(i-1,0)} - N_{(i-2,1)} \\ N_{(0,i)} &= (N_{(i,0)})^{tr} \end{aligned} \quad (2.31)$$

where it is understood that  $N_{(i,j)} = 0$  if  $i < 0$  or  $j < 0$ .

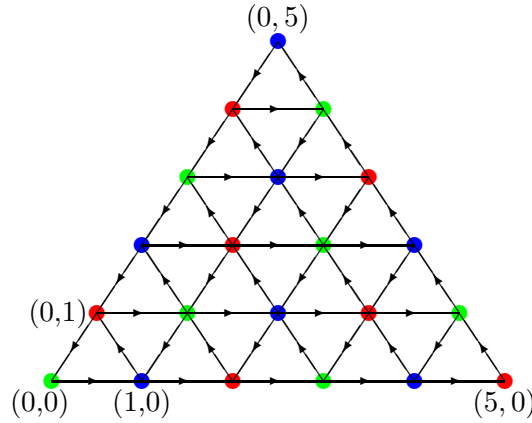


Figure 2.3: The  $\mathcal{A}_5$  diagram.

**Determination of toric matrices  $W_{z_0}$**  We have  $d_O = \text{Tr}(\mathcal{M}\mathcal{M}^\dagger) = 24$ . The matrices  $K_{ij} = N_i \mathcal{M} N_j^{tr}$  span a vector space of dimension  $r = 24$ . This is therefore equal to  $d_O$ , the toric matrices  $W_{x_0}$  are linearly independent and form a special basis for this vector space. For each matrix  $K_{ij}$  we calculate the squared norm given by  $\|K_{ij}\|^2 = (K_{ij})_{i^*j^*}$ .

- For squared norm 1 we have 21 linearly independent matrices  $K_{ij}$ , each one being equal to a toric matrix  $W_{z_0}$ .
- There are 45 linearly independent matrices  $K_{ij}$  of squared norm 2. Some of them are equal to the sum of two already determined toric matrices. For a matrix not satisfying this property, say  $K_{ab}$ , we build the set of matrices  $K_{ab} - W_x$ , where  $W_x$  runs into the set of determined toric matrices, and look for those which have non-negative integer

coefficients. This condition is strong enough and leads to only one solution (if  $K_{ab}$  is the sum of a determined matrix and a new one). We determine in that way the last three toric matrices.

- We have therefore determined the set of 24 toric matrices  $W_x$ , with  $0 \leq x \leq 23$  and we can check our result by an explicit verification of the modular splitting equation (2.9).

**Determination of  $V_{ij}$**  Having determined the set of toric matrices  $W_{x0}$ , we compute the set of matrices  $K_{ij}^x = N_i W_{x0} N_j^{tr}$ . For  $SU(3)$  cases, all double fusion matrices  $V_{ij}$  are generated by the two fundamental matrices  $V_{(1,0),(0,0)}$ ,  $V_{(0,0),(1,0)}$  and their transposed  $V_{(0,1),(0,0)} = V_{(1,0),(0,0)}^{tr}$ ,  $V_{(0,0),(0,1)} = V_{(0,0),(1,0)}^{tr}$ . In order to determine these matrices, it is therefore sufficient to compute the decomposition of  $K_{(1,0),(0,0)}^x$  and  $K_{(0,0),(1,0)}^x$  on the set of toric matrices  $W_{x0}$  using Eq.(2.16). The calculation is straightforward. From the knowledge of the fundamental matrices  $V_{(1,0),(0,0)}$ ,  $V_{(0,0),(1,0)}$  and their transposed, all double fusion matrices  $V_{ij}$  are recursively calculated from Eqs.(2.17–2.19).

**The Ocneanu graph of quantum symmetries** The four fundamental matrices explicitly given below, in Eqs.(2.33), are the adjacency matrices of the graph of quantum symmetries (Ocneanu graph) associated to the initial modular invariant. We display in figure 2.4 the graph corresponding to the matrix  $V_{(1,0),(0,0)}$  associated to the vertex labelled by  $2_1 \otimes 1_0$ .  $V_{(0,0),(1,0)}$  is associated to the vertex  $1_5 \otimes 2_0$ , and instead of displaying the corresponding arrows, we display the action of the chiral conjugation  $C$  in order to not clutter the figure (warning: see the last footnote). The arrows corresponding to the matrix  $V_{(0,1),(0,0)}$ , associated to the vertex  $2_2 \otimes 1_0$ , are obtained by reversing the ones of figure 2.4; for the matrix  $V_{(0,0),(0,1)}$ , associated to the vertex  $1_4 \otimes 2_0$ , we use the chiral conjugation and the reversed arrows.

**The generalized Dynkin diagram  $\mathcal{E}_5$**  The graph of figure 2.4 is made of two copies of the generalized Dynkin diagram  $\mathcal{E}_5$ . The  $\mathcal{E}_5$  graph has 12 vertices denoted by  $1_i, 2_i, i = 0, 1, \dots, 5$ . The unit is  $1_0$  and the generators are  $2_1$  and  $2_2$ , the orientation of the graph corresponds to multiplication by  $2_1$ . Conjugation corresponds to the symmetry with respect to the axis passing through vertices  $1_0$  and  $1_3$ :  $1_0^* = 1_0, 1_1^* = 1_5, 1_2^* = 1_4, 1_3^* = 1_3; 2_0^* = 2_3, 2_1^* = 2_2, 2_4^* = 2_5$ . The  $\mathcal{E}_5$  graph determines in a unique way its graph algebra (it is a subgroup graph). The commutative multiplication table is given by:

$$\begin{aligned} 1_i \cdot 1_j &= 1_{i+j} \\ 1_i \cdot 2_j = 2_i \cdot 1_j &= 2_{i+j} & i, j = 0, 1, \dots, 5 \quad \text{mod } 6 & \quad (2.32) \\ 2_i \cdot 2_j &= 2_{i+j} + 2_{i+j-3} + 1_{i+j-3} \end{aligned}$$

From this multiplication table we get the graph algebra matrices  $G_a$  associated to the vertices  $a \in \mathcal{E}_5$ . The one corresponding to the generator  $2_1$  is the adjacency matrix of the graph. The vector space spanned by vertices of  $\mathcal{E}_5$  is a module under the action of vertices of  $\mathcal{A}_5$ , the

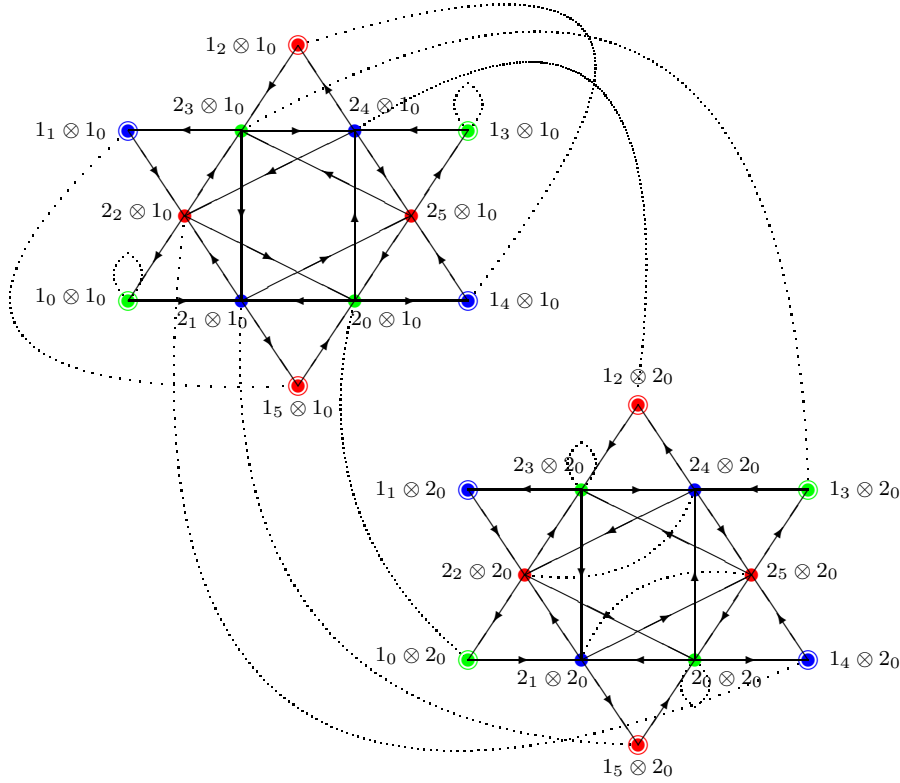


Figure 2.4: Ocneanu graph  $Oc(\mathcal{E}_5)$ . The two left chiral generators are  $2_1 \otimes 1_0$  and  $2_2 \otimes 1_0$ , the two right chiral generators are  $1_5 \otimes 2_0$  and  $1_4 \otimes 2_0$ .

action being encoded by the annular matrices  $F_i$  obtained from the recurrence relation (2.31) with starting point  $F_{(0,0)} = \mathbf{1}_{12}$ ,  $F_{(1,0)} = G_{2_1}$  and  $F_{(0,1)} = G_{2_2}$ .

Choosing a special ordering in the set of indices  $z$  of the algebra of quantum symmetries, and using the  $12 \times 12$  graph algebra matrices  $G_a$  of the graph  $\mathcal{E}_5$ , the fundamental double fusion matrices are given by

$$\begin{aligned}
 V_{(1,0),(0,0)} &= \left( \begin{array}{c|c} G_{2_1} & \cdot \\ \cdot & G_{2_1} \end{array} \right) & V_{(0,0),(1,0)} &= \left( \begin{array}{c|c} \cdot & G_{1_5} \\ G_{1_2} & G_{1_2} + G_{1_5} \end{array} \right) \\
 V_{(0,1),(0,0)} &= \left( \begin{array}{c|c} G_{2_2} & \cdot \\ \cdot & G_{2_2} \end{array} \right) & V_{(0,0),(0,1)} &= \left( \begin{array}{c|c} \cdot & G_{1_4} \\ G_{1_1} & G_{1_1} + G_{1_4} \end{array} \right)
 \end{aligned} \tag{2.33}$$

**Realization of  $Oc(\mathcal{E}_5)$**  The algebra of quantum symmetries  $Oc(\mathcal{E}_5)$  can be realized as

$$Oc(\mathcal{E}_5) = \mathcal{E}_5 \otimes_J \mathcal{E}_5 \quad \text{with } a \otimes_J b.c = a.b^* \otimes_J c \quad \text{for } b \in J = \{1_i\}, \tag{2.34}$$

where  $J$  is a subalgebra characterized by modular properties (see [6, 25]). The algebra  $Oc(\mathcal{E}_5)$  has dimension  $12 \times 2 = 24$ , and a basis is given by elements  $a \otimes_J 1_0$  and  $a \otimes_J 2_0$ . The

identifications in  $Oc(\mathcal{E}_5)$  are given by:

$$\begin{aligned}
1_i \otimes_J 1_j &= 1_{i+j^*} \otimes_J 1_0 \\
2_i \otimes_J 1_j &= 2_{i+j^*} \otimes_J 1_0 \\
1_i \otimes_J 2_j &= 1_i \otimes_J 1_j \cdot 2_0 = 1_{i+j^*} \otimes_J 2_0 \\
2_i \otimes_J 2_j &= 2_i \otimes_J 1_j \cdot 2_0 = 2_{i+j^*} \otimes_J 2_0
\end{aligned} \tag{2.35}$$

The chiral conjugation is defined by  $(a \otimes_J b)^C = b \otimes_J a$ . The left chiral generator is  $2_1 \otimes_J 1_0$  and the right chiral generator is  $1_0 \otimes_J 2_1 = 1_5 \otimes_J 2_0$ . Multiplication in  $Oc(\mathcal{E}_5)$  is defined from the multiplication (2.32) of  $\mathcal{E}_5$  together with the identifications (2.35), and is encoded by the quantum symmetries matrices  $O_x$ . We get:

$$O_{x=a \otimes_J 1_0} = \begin{pmatrix} G_a & \cdot \\ \cdot & G_a \end{pmatrix} \quad O_{x=a \otimes_J 2_0} = \begin{pmatrix} \cdot & G_a \\ G_a \cdot G_{1_3} & G_a(\mathbf{1} + G_{1_3}) \end{pmatrix} \tag{2.36}$$

The vector space of  $\mathcal{E}_5$  vertices is also a module under the action of vertices of  $Oc(\mathcal{E}_5)$  defined by  $(a \otimes_J 1_0) \cdot b = a \cdot b$  and  $(a \otimes_J 2_0) \cdot b = a \cdot 2_0 \cdot b$ . The dual annular matrices  $S_x$  are given by  $S_{x=a \otimes_J 1_0} = G_a$  and  $S_{x=a \otimes_J 2_0} = G_{2_0} \cdot G_a$ . We check the dimensional rules  $\dim(\mathcal{B}(\mathcal{E}_5)) = \sum_i d_i^2 = \sum_x d_x^2 = 29\,376$ .

### 2.4.3 The $\mathcal{E}_5^*$ case of $\widehat{su}(3)$

We start now with the following  $\widehat{su}(3)_5$  modular invariant partition function:

$$\begin{aligned}
\mathcal{Z} &= |\chi_{(0,0)}^5 + \chi_{(2,2)}^5|^2 + |\chi_{(3,0)}^5 + \chi_{(0,3)}^5|^2 + [(\chi_{(0,2)}^5 + \chi_{(3,2)}^5) \cdot \overline{(\chi_{(2,0)}^5 + \chi_{(2,3)}^5)} + \text{h.c.}] \\
&\quad + (\chi_{(2,1)}^5 + \chi_{(0,5)}^5) \cdot \overline{(\chi_{(1,2)}^5 + \chi_{(5,0)}^5)} + \text{h.c.} \, ,
\end{aligned} \tag{2.37}$$

and compute the modular matrix<sup>6</sup>  $\mathcal{M}$ . The fusion matrices  $N_i$  are the same as in the previous case.

**Determination of toric matrices and double fusion matrices** We have  $d_O = \text{Tr}(\mathcal{M}\mathcal{M}^\dagger) = 24$ . The matrices  $K_{ij} = N_i \mathcal{M} N_j^{\text{tr}}$  span a vector space of dimension  $r = d_O = 24$ . The discussion is the same as in the previous case.

- For squared norm 1 we have 21 linearly independent matrices  $K_{ij}$  defining 21 toric matrices  $W_{z_0}$ .
- There are 45 linearly independent matrices  $K_{ij}$  of squared norm 2 and the last three toric matrices  $W_{z_0}$  can be obtained.

---

<sup>6</sup>Same remark as in the last footnote.

Once the toric matrices have been determined, the double fusion matrices are obtained straightforwardly. For the fundamental ones we get:

$$\begin{aligned}
 V_{(1,0),(0,0)} &= \left( \begin{array}{c|c} G_{21} & \cdot \\ \cdot & G_{21} \end{array} \right) & V_{(0,0),(1,0)} &= \left( \begin{array}{c|c} \cdot & G_{11} \\ G_{14} & G_{11} + G_{14} \end{array} \right) \\
 V_{(0,1),(0,0)} &= \left( \begin{array}{c|c} G_{22} & \cdot \\ \cdot & G_{22} \end{array} \right) & V_{(0,0),(0,1)} &= \left( \begin{array}{c|c} \cdot & G_{12} \\ G_{15} & G_{12} + G_{15} \end{array} \right)
 \end{aligned} \tag{2.38}$$

**The Ocneanu graph of quantum symmetries** We display in figure 2.5 the graph corresponding to the matrix  $V_{(1,0),(0,0)}$  associated with the vertex labelled by  $2_1 \otimes 1_0$ .  $V_{(0,0),(1,0)}$  is associated with the vertex  $1_1 \otimes 2_0$ . The algebra of quantum symmetries can be realized as

$$Oc(\mathcal{E}_5^*) = \mathcal{E}_5 \otimes_J \mathcal{E}_5 \quad \text{with } a \otimes_J b.c = a.b \otimes_J c \quad \text{for } b \in J = \{1_i\}. \tag{2.39}$$

The algebra  $Oc(\mathcal{E}_5^*)$  has also dimension  $12 \times 2 = 24$  and a basis is given by elements  $a \otimes_J 1_0$  and  $a \otimes_J 2_0$ . The identifications in  $Oc(\mathcal{E}_5^*)$  are given by (different from those of  $Oc(\mathcal{E}_5)$ )

$$\begin{aligned}
 1_i \otimes_J 1_j &= 1_{i+j} \otimes_J 1_0 \\
 2_i \otimes_J 1_j &= 2_{i+j} \otimes_J 1_0 \\
 1_i \otimes_J 2_j &= 1_i \otimes_J 1_j.2_0 = 1_{i+j} \otimes_J 2_0 \\
 2_i \otimes_J 2_j &= 2_i \otimes_J 1_j.2_0 = 2_{i+j} \otimes_J 2_0
 \end{aligned} \tag{2.40}$$

The left chiral generator is  $2_1 \otimes_J 1_0$  and the right chiral generator is  $1_0 \otimes_J 2_1 = 1_1 \otimes_J 2_0$ . The algebra  $Oc(\mathcal{E}_5^*)$  is isomorphic to  $Oc(\mathcal{E}_5)$ , the quantum symmetry matrices  $O_x$  are still given by (2.36). The difference is in the chiral conjugacy.

**The generalized Dynkin diagram  $\mathcal{E}_5^* = \mathcal{E}_5/3$**  The graph associated to the initial modular invariant (2.37) is a module graph for the Ocneanu graph displayed on figure 2.5. It must therefore be a module graph of the  $\mathcal{E}_5$  graph itself: it is obtained as the  $Z_3$ -orbifold graph of  $\mathcal{E}_5$  (see [14]). We write this module property  $a\tilde{b} = \sum_{\tilde{c}} (F_a^\mathcal{E})_{\tilde{b}\tilde{c}} \tilde{c}$ , for  $a \in \mathcal{E}_5$  and  $\tilde{b}, \tilde{c} \in \mathcal{E}_5/3$ , encoded by the 12 matrices  $F_a^\mathcal{E}$ . From the associative property  $(a.b).\tilde{c} = a.(b.\tilde{c})$ , these matrices must satisfy the same commutation relations (2.32) as the graph algebra of  $\mathcal{E}_5$ , and can be recursively calculated from  $F_{2_1}^\mathcal{E}$ , which is the adjacency matrix of the  $\mathcal{E}_5/3$  graph displayed on figure 2.6. The  $\mathcal{E}_5/3$  graph is also a module over the algebra of quantum symmetries, the action being defined by  $(a \otimes_J 1_0).\tilde{b} = a.\tilde{b}$  and  $(a \otimes_J 2_0).b = a.2_0.\tilde{b}$ . The dual annular matrices  $S_x$  are therefore given by  $S_{x=a \otimes_J 1_0} = F_a^\mathcal{E}$  and  $S_{x=a \otimes_J 2_0} = F_{2_0}^\mathcal{E}.F_a^\mathcal{E}$ . We check the dimensional rules  $\dim(\mathcal{B}(\mathcal{E}_5^*)) = \sum_i d_i^2 = \sum_x d_x^2 = 3264$ .

So both graphs  $G = \mathcal{E}_5$  and  $\mathcal{E}_5/3$  have the same (isomorphic) algebra  $Oc(G)$  of quantum symmetries, but its realization in terms of tensor square of  $\mathcal{E}_5$  is different in the two cases, as well as the chiral conjugation, and, of course, its module action on  $\mathcal{E}_5$  or on  $\mathcal{E}_5/3$ .

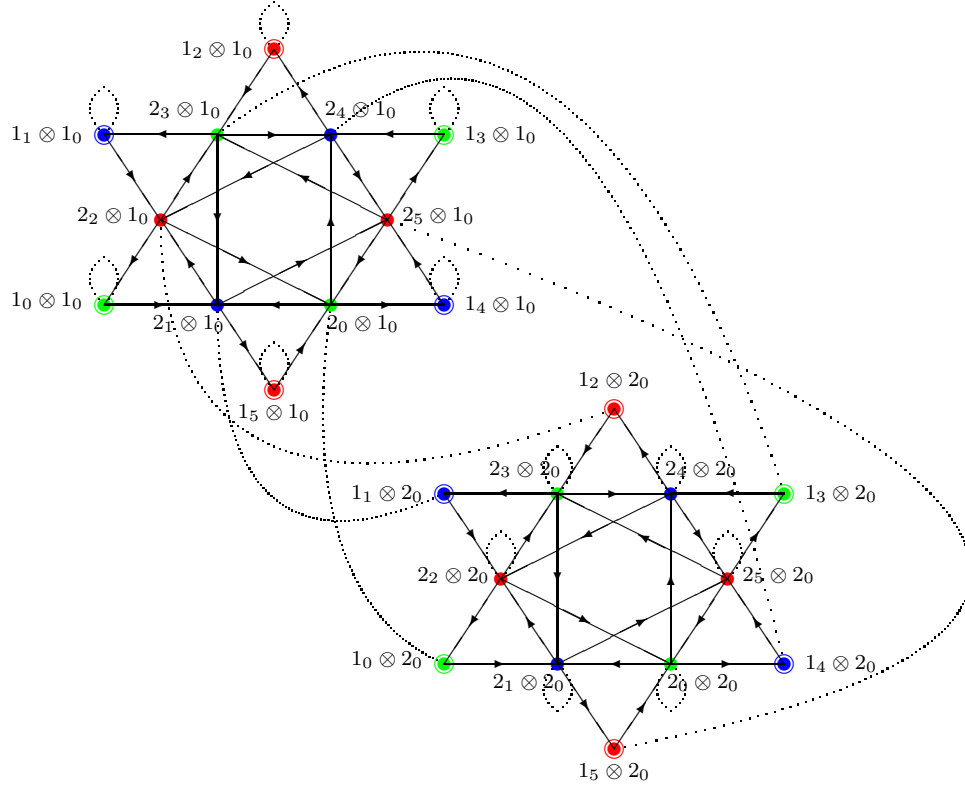


Figure 2.5: Ocneanu graph  $Oc(\mathcal{E}_5)^*$ . The two left chiral generators are  $2_1 \otimes 1_0$  and  $2_2 \otimes 1_0$ , the two right chiral generators are  $1_1 \otimes 2_0$  and  $1_2 \otimes 2_0$ .

#### 2.4.4 The $\mathcal{E}_9$ case of $su(3)$

We start with the following  $\widehat{su}(3)_9$  modular invariant partition function:

$$\mathcal{Z} = |\chi_{0,0}^9 + \chi_{0,9}^9 + \chi_{9,0}^9 + \chi_{1,4}^9 + \chi_{4,1}^9 + \chi_{4,4}^9|^2 + 2|\chi_{2,2}^9 + \chi_{2,5}^9 + \chi_{5,2}^9|^2, \quad (2.41)$$

where  $\chi_i^9$ 's are the characters of  $\widehat{su}(3)_9$ , labelled by  $i = (i_1, i_2)$  with  $0 \leq i_1, i_2 \leq 9$ ,  $i_1 + i_2 \leq 9$ . The modular invariant matrix is recovered from  $\mathcal{Z} = \sum_i \chi_i \mathcal{M}_{ij} \bar{\chi}_j$ . The number of irreps is  $d_{\mathcal{A}} = 55$ . The fusion matrix  $N_{(1,0)}$  is the adjacency matrix of the  $\mathcal{A}_9$  graph, the truncated Weyl alcove of  $SU(3)$  irreps at level 9. The other fusion matrices are determined by the recurrence relation (2.32).

**Determination of toric matrices  $W_{z_0}$**  We have  $d_{\mathcal{O}} = Tr(\mathcal{M}\mathcal{M}^\dagger) = 72$  and therefore an Ocneanu algebra with 72 generators  $z$  and also 72 toric matrices  $W_{z_0}$ . However these toric matrices span a vector space of dimension  $r = 45 < 72$ , i.e. they are not all linearly independent. For each matrix  $K_{ij} = N_i \mathcal{M}_{ij} N_j^{tr}$  we consider its “squared norm” defined by  $\|K_{ij}\|^2 = (K_{ij})_{i^* j^*}$ :

- There are 27 matrices  $K_{ij}$  with squared norm 1, each one defines a toric matrix  $W_{z_0}$ .

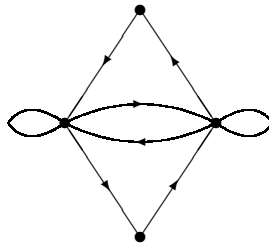


Figure 2.6: The  $\mathcal{E}_5^* = \mathcal{E}_5/3$  generalized Dynkin diagram.

- There are 12 linearly independent matrices  $K_{ij}$  with squared norm 2, but each one is equal to the sum of two already determined matrices. We don't find any new toric matrix in this family.
- There are 21 linearly independent matrices  $K_{ij}$  of squared norm 3, none of them being equal to the sum of three already obtained matrices. Twelve among these 21 are equal to the sum of one determined matrix and a matrix having coefficients multiple of 2. A solution leading to squared norm 3 is to define a new toric matrix by dividing by 2 the matrix with coefficients multiple of 2, and adding them to the list with a multiplicity two. From these twelve we obtain actually only eight different toric matrices (because some are obtained more than once), each one coming with multiplicity two. Nine of the 21 matrices have coefficients which are multiple of 3. We define nine new toric matrices by dividing these matrices by 3, each toric matrix obtained in that way appearing with multiplicity 3. At that stage, we have determined  $27 + (2 \times 8) + (3 \times 9) = 70$  toric matrices.
- There are 24 linearly independent matrices  $K_{ij}$  with squared norm 4, but each one is equal to the sum of four already obtained matrices. We don't recover any new toric matrix. This is also the case for squared norm 5.
- There are 10 linearly independent matrices  $K_{ij}$  with squared norm 6. We discard those that can be written as a linear combination of already determined toric matrices, and pick up one of the others, for example  $K_{ab}$ . We build the list of matrices  $K_{ab} - W_x$ , for  $W_x$  running into the set of already obtained toric matrices, searching for matrices with non-negative coefficients. With our choice, it is so that  $K_{ab}$  is the sum of two times a toric matrix plus a new one which has matrix elements multiple of 2. Dividing the later by 2 and adding it to the list, with multiplicity 2, we get the last toric matrices.

We have indeed therefore determined the 72 toric matrices, 45 ( $=27+9+8+1$ ) of them being linearly independent, but appearing with multiplicities (27 of multiplicity one, 9 ( $=8+1$ ) of multiplicity two and 9 of multiplicity three). We can check the result by a direct substitution in the  $55 \times 55 = 3025$  matrix equations over non-negative integers (2.12).

**Determination of  $V_{(1,0),(0,0)}$  and  $V_{(0,0),(1,0)}$**  We compute the set of matrices  $K_{ij}^x = N_i W_{x0} N_j^t$  for  $\{ij\} = \{(1,0), (0,0)\}$  and  $\{(0,0), (1,0)\}$ , and decompose them on the family (not a base) of toric matrices  $W_{z0}$  using (2.12). Since the  $W_{z0}$  are not linearly independent, the decomposition is not unique, and we introduce some undetermined coefficients. Imposing that they should be non-negative integers allows to fix some of them or to obtain relations between them. More constraints come from the fact that we have  $V_{(0,0),(1,0)} = C.V_{(0,0),(1,0)}.C^{-1}$ , where  $C$  is the chiral operator. Notice that  $C$  itself is deduced from the previous relation even if  $V_{(0,0),(1,0)}$  and  $V_{(0,0),(1,0)}$  still contain free parameters, by using the fact that it is a permutation matrix. Choosing an appropriate order on the set of indices  $z$ , we obtain the following structure for  $V_{(1,0),(0,0)}$ :

$$V_{(1,0),(0,0)} = \begin{pmatrix} Ad(\mathcal{E}_9) & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & Ad(\mathcal{E}_9) & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & Ad(\mathcal{E}_9) & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & Ad(\mathcal{M}_9) & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & Ad(\mathcal{M}_9) & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & Ad(\mathcal{M}_9) \end{pmatrix} \quad (2.42)$$

where  $Ad(\mathcal{E}_9)$  and  $Ad(\mathcal{M}_9)$  are  $12 \times 12$  matrices (still containing some unknown coefficients).

**The generalized Dynkin diagram  $\mathcal{E}_9$**  The  $Ad(\mathcal{E}_9)$  matrix is the adjacency matrix of the graph  $\mathcal{E}_9$  displayed on the l.h.s. of figure 2.7. It possesses a  $\mathbb{Z}_3$ -symmetry corresponding to the permutation of the three “wings” formed by vertices  $0_i$ ,  $1_i$  and  $2_i$ . The undetermined coefficients of the adjacency matrix reflect this symmetry; they are simply fixed once an ordering has been chosen for the vertices (something similar happens for the  $D_{even}$  series of the  $su(2)$  family).

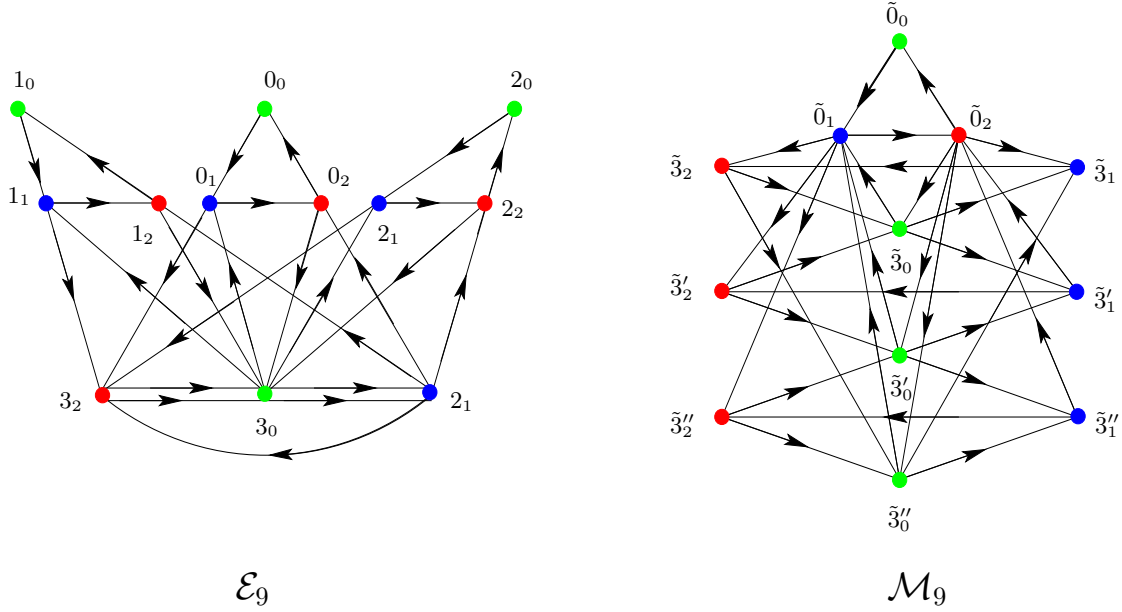
The vector space of the  $\mathcal{E}_9$  graph is a module over the left-right action of the graph algebra of the  $\mathcal{A}_9$  graph, encoded by the annular matrices  $F_i^\mathcal{E}$

$$\mathcal{A}_9 \times \mathcal{E}_9 \rightarrow \mathcal{E}_9 : \quad i \cdot a = a \cdot i = \sum_b (F_i^\mathcal{E})_{ab} b \quad i \in \mathcal{A}_9, \quad a, b \in \mathcal{E}_9. \quad (2.43)$$

The  $F_i^\mathcal{E}$  matrices give a representation of dimension 12 of the fusion algebra and are determined from the recursion relation (2.32) with  $F_{(0,0)}^\mathcal{E} = \mathbf{1}_{12 \times 12}$ ,  $F_{(1,0)}^\mathcal{E} = Ad(\mathcal{E}_9)$ . We notice that fundamental matrices (for instance  $F_{(1,0)}$ ) contain, in this case, elements bigger than 1, however, the “rigidity<sup>7</sup> condition”  $(F_i)_{ab} = (F_{i^*})_{ba}$  holds, so that this example is indeed an higher analogue of the ADE graphs, not an higher analogue of the non simply laced cases. Triality and conjugation compatible with the action of  $\mathcal{A}_9$  can be defined on the  $\mathcal{E}_9$  graph. Triality is denoted by the index  $i \in \{0, 1, 2\}$  in the set of vertices  $0_i, 1_i, 2_i$ . The conjugation corresponds to the vertical axis going through vertices  $0_0$  and  $3_0$ :  $0_0^* = 0_0, 1_0^* = 2_0, 3_0^* = 3_0$ ,

<sup>7</sup>We call it that way because of its relation with the theory of rigid categories, see for instance [21]).



Figure 2.7: The graphs  $\mathcal{E}_9$  and  $\mathcal{M}_9$ 

**The generalized Dynkin diagram  $\mathcal{M}_9$**  The matrix  $Ad(\mathcal{M}_9)$  is a  $12 \times 12$  matrix with some unknown coefficients to be determined. Imposing this matrix to be the adjacency matrix of a graph such that the vector space spanned by its vertices is a module over the graph algebras of  $\mathcal{A}_9$  and of  $\mathcal{E}_9$  leads to a unique solution. The graph is displayed on the r.h.s. of figure 2.7 and corresponds to the  $\mathbb{Z}_3$ -orbifold graph of  $\mathcal{E}_9$ , denoted  $\mathcal{M}_9 = \mathcal{E}_9/3$ .

The vector space spanned by vertices of the  $\mathcal{M}_9$  graph is a module over the left-right action of the graph algebra of  $\mathcal{A}_9$  encoded by the annular matrices  $F_i^{\mathcal{M}}$

$$\mathcal{A}_9 \times \mathcal{M}_9 \rightarrow \mathcal{M}_9 : \quad i \cdot \tilde{a} = \tilde{a} \cdot i = \sum_{\tilde{b}} (F_i^{\mathcal{M}})_{\tilde{a}\tilde{b}} \tilde{b} \quad i \in \mathcal{A}_9, \quad \tilde{a}, \tilde{b} \in \mathcal{M}_9. \quad (2.45)$$

The  $F_i^{\mathcal{M}}$  matrices give a representation of dimension 12 of the fusion algebra and can be determined from the recursion relation (2.32) with  $F_{(0,0)}^{\mathcal{M}} = \mathbf{1}_{12 \times 12}$ ,  $F_{(1,0)}^{\mathcal{M}} = Ad(\mathcal{M}_9)$ . Triality and conjugation compatible with the action of  $\mathcal{A}_9$  can be defined on the  $\mathcal{M}_9$  graph. Triality is denoted by the index  $i \in \{0, 1, 2\}$  in the set of vertices  $\tilde{a}_i \in \mathcal{M}_9$ . The conjugation corresponds to the vertical axis going through vertex  $\tilde{0}_0$ :  $\tilde{0}_0^* = \tilde{0}_0$ ,  $\tilde{0}_1^* = \tilde{0}_2$ ,  $\tilde{3}_0^* = \tilde{3}_0$ ,  $\tilde{3}_0'^* = \tilde{3}_0'$ ,  $\tilde{3}_0''^* = \tilde{3}_0''$ ,  $\tilde{3}_1^* = \tilde{3}_2$ ,  $\tilde{3}_1'^* = \tilde{3}_2'$ ,  $\tilde{3}_1''^* = \tilde{3}_2''$ .

The vector space spanned by vertices of  $\mathcal{M}_9$  is also a module under the action of the graph algebra of  $\mathcal{E}_9$ . Here we will distinguish between left and right action. The left action of  $\mathcal{E}_9$  is encoded by a set of  $12 \times 12$  matrices denoted  $P_i^{\ell}$

$$\mathcal{E}_9 \times \mathcal{M}_9 \rightarrow \mathcal{M}_9 : \quad a \cdot \tilde{b} = \sum_{\tilde{c}} (P_a^{\ell})_{\tilde{b}\tilde{c}} \tilde{c} \quad a \in \mathcal{E}_9, \quad \tilde{b}, \tilde{c} \in \mathcal{M}_9. \quad (2.46)$$

The right action of  $\mathcal{E}_9$  is defined via the  $\mathbb{Z}_2$  operator  $\rho_2$ :

$$\tilde{b} \cdot a = \rho_2(a) \cdot \tilde{b} \quad (2.47)$$

and is encoded by a set of  $12 \times 12$  matrices denoted  $P_a^r$ :  $\tilde{b} \cdot a = \sum_{\tilde{c}} (P_a^r)_{\tilde{b}\tilde{c}} \tilde{c}$  with  $P_a^r = P_{\rho_2(a)}^\ell$ . The module property  $(a \cdot b) \cdot \tilde{c} = a \cdot (b \cdot \tilde{c})$  imposes  $P_a^\ell$  matrices to form a representation of the graph algebra of  $\mathcal{E}_9$ ; they satisfy  $P_a^\ell P_b^\ell = \sum_c (G_a)_{bc} P_c^\ell$ . Similar relations exist for  $P_a^r$  matrices. We can compute the set of matrices  $P_a^\ell$  using the multiplicative structure of  $\mathcal{E}_9$ . We give below the expression for  $P_{1_0}^\ell$  and  $P_{2_0}^\ell$ , the other matrices being defined by  $P_{0_0}^\ell = \mathbf{1}$ ,  $P_{0_1}^\ell = (P_{0_2}^\ell)^{tr} = Ad(\mathcal{M}_9)$ ,  $P_{3_0}^\ell = P_{0_1}^\ell P_{0_2}^\ell - P_{0_0}^\ell$ ,  $P_{3_2}^\ell = (P_{3_1}^\ell)^{tr} = P_{0_1}^\ell P_{0_1}^\ell - P_{0_2}^\ell$ ,  $P_{1_1}^\ell = (P_{2_2}^\ell)^{tr} = P_{0_1}^\ell P_{1_0}^\ell$ ,  $P_{1_2}^\ell = (P_{2_1}^\ell)^{tr} = P_{0_2}^\ell P_{1_0}^\ell$ . In the ordered basis  $(\tilde{0}_0, \tilde{3}_0, \tilde{3}'_0, \tilde{3}''_0; \tilde{0}_1, \tilde{3}_1, \tilde{3}'_1, \tilde{3}''_1; \tilde{0}_2, \tilde{3}_2, \tilde{3}'_2, \tilde{3}''_2)$ ,  $P_{1_0}^\ell$  and  $P_{2_0}^\ell$  are given by

$$P_{1_0}^\ell = (P_{2_0}^\ell)^{tr} = \begin{pmatrix} 1 & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & 1 & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & 1 & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & 1 & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & 1 & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & 1 & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & 1 & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & 1 & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & 1 & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & 1 & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & 1 & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & 1 \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & 1 \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & 1 \end{pmatrix} \quad (2.48)$$

There is also an operator  $\rho'_3$  acting on vertices of the  $\mathcal{M}_9$  graph, inherited from the  $\mathbb{Z}_3$  symmetry of the  $\mathcal{E}_9$  graph through the orbifold procedure. It satisfies the following property:

$$\rho_3(a) \tilde{b} = a \rho'_3(\tilde{b}) \quad (2.49)$$

We have  $1_0 a = \rho_3(a)$ , so  $\rho'_3(\tilde{a}) = 1_0 \tilde{a}$ . It is defined by  $\rho'_3(\tilde{0}_i) = \tilde{0}_i$ ,  $\rho'_3(\tilde{3}_i) = \tilde{3}'_i$ ,  $\rho'_3(\tilde{3}'_i) = \tilde{3}''_i$ ,  $\rho'_3(\tilde{3}''_i) = \tilde{3}_i$ , for  $i = 0, 1, 2$ . The matrix  $P_{1_0}^\ell$  is therefore the permutation matrix representing the action of the  $\mathbb{Z}_3$  operator  $\rho'_3$ . We have  $(P_{1_0}^\ell)^3 = \mathbf{1}$  and  $(P_{1_0}^\ell)^2 = P_{2_0}^\ell$ , so  $P_{2_0}^\ell$  represents the operator  $(\rho'_3)^2$ .

**The vector space  $\mathcal{E}_9 \oplus \mathcal{M}_9$**  We define the vector space  $H = \mathcal{E}_9 \oplus \mathcal{M}_9$ , and we want to define (this will be used later) an associative product on  $H$  with the following structure:

$$\begin{array}{c|cc} \nearrow & \mathcal{E}_9 & \mathcal{M}_9 \\ \hline \mathcal{E}_9 & \mathcal{E}_9 & \mathcal{M}_9 \\ \mathcal{M}_9 & \mathcal{M}_9 & \mathcal{E}_9 \end{array}$$

We define the following multiplications:

$$\begin{aligned}
\mathcal{E}_9 \times \mathcal{E}_9 &\rightarrow \mathcal{E}_9 & : & \quad a b = \sum (G_a)_{bc} c \\
\mathcal{E}_9 \times \mathcal{M}_9 &\rightarrow \mathcal{M}_9 & : & \quad a \tilde{b} = \sum_c^c (P_a^\ell)_{\tilde{b}\tilde{c}} \tilde{c} \\
\mathcal{M}_9 \times \mathcal{E}_9 &\rightarrow \mathcal{M}_9 & : & \quad \tilde{b} a = \sum_{\tilde{c}} (P_a^r)_{\tilde{b}\tilde{c}} \tilde{c} \\
\mathcal{M}_9 \times \mathcal{M}_9 &\rightarrow \mathcal{E}_9 & : & \quad \tilde{a} \tilde{b} = \sum_c (H_{\tilde{a}})_{\tilde{b}c} c.
\end{aligned} \tag{2.50}$$

The associativity property on  $H$  reads  $a(bc) = (ab)c$  ;  $a(b\tilde{c}) = (a\tilde{b})\tilde{c}$  ;  $a(\tilde{b}c) = (a\tilde{b})c$  ;  $\tilde{a}(bc) = (\tilde{a}b)c$  ;  $\tilde{a}(\tilde{b}\tilde{c}) = (\tilde{a}\tilde{b})\tilde{c}$  ;  $\tilde{a}(b\tilde{c}) = (\tilde{a}b)\tilde{c}$  ;  $\tilde{a}(\tilde{b}c) = (\tilde{a}\tilde{b})c$  ;  $\tilde{a}(\tilde{b}\tilde{c}) = (\tilde{a}\tilde{b})\tilde{c}$ , and induce a set of relations between matrices  $G_a, P_a^\ell, P_a^r$  and  $H_a$ . In order to satisfy them, the unique solution for coefficients of the  $H_c$  matrices is given by:

$$(H_c)_{\tilde{a}\tilde{b}} = (P_{\rho_2(c)}^\ell)_{\tilde{a}^*\tilde{b}} = (P_c^r)_{\tilde{a}^*\tilde{b}}. \tag{2.51}$$

**The Ocneanu algebra of quantum symmetries and a realization** The matrix  $V_{(1,0),(0,0)}$  is the adjacency matrix of the left chiral part of the Ocneanu graph. The graph is composed of six subgraphs, three copies of the  $\mathcal{E}_9$  graph and three copies of the  $\mathcal{M}_9$  graph, as showed on figure 2.8. We label the vertices as follows:  $x = a \otimes 0_i$  with  $a, 0_i \in \mathcal{E}_9$  and  $i = 0, 1, 2$  for vertices of  $\mathcal{E}_9$ -type subgraphs and  $x = \tilde{a} \otimes \tilde{3}_i$  with  $\tilde{a}, \tilde{3}_i \in \mathcal{M}_9$  and  $i = 0, 1, 2$  for vertices of  $\mathcal{M}_9$ -type subgraphs. The matrix  $V_{(1,0),(0,0)}$  corresponds to the multiplication by the left chiral generator  $0_1 \otimes 0_0$ . The matrix  $V_{(0,0),(1,0)}$  is the adjacency matrix of the right chiral part of the Ocneanu graph  $Oc(\mathcal{E}_9)$ , and corresponds to the multiplication by the right chiral generator  $0_0 \otimes 0_1$ . The dashed lines in the graph corresponds to the chiral operator  $C$ . We have  $V_{(0,0),(1,0)} = CV_{(1,0),(0,0)}C^{-1}$ . The multiplication by  $0_0 \otimes 0_1$  is obtained as follows. We start with  $x$ , apply  $C$ , multiply the result by  $0_1 \otimes 0_0$ , and apply  $C^{-1} = C$ . From matrices  $V_{(1,0),(0,0)}$  and  $V_{(0,0),(1,0)}$  all others  $V_{ij}$  (hence also the double toric matrices  $W_{xy}$ ) are calculated straightforwardly using equations (2.17–2.19).

From the multiplication by chiral left and right generators  $0_1 \otimes 0_0$  and  $0_0 \otimes 0_1$  (and their conjugate) we reconstruct the multiplication table of  $Oc(\mathcal{E}_9)$ . As for the graph matrices of  $\mathcal{E}_9$ , the calculation is not straightforward, but imposing non-negative integer coefficients leads to a unique solution. The result is encoded in the 72 quantum symmetry matrices  $O_x$  of dimension  $72 \times 72$ .

**Realization of the quantum symmetry algebra** In order to have a compact (readable) description of these matrices and the multiplicative structures of the algebra of quantum symmetries, we propose the following realization of the algebra of quantum symmetries:

$$Oc = \text{“}\mathcal{E}_9 \otimes_{\mathbb{Z}_3} \mathcal{E}_9\text{”} \doteq (\mathcal{E}_9 \otimes_\rho \mathcal{E}_9) \oplus (\mathcal{M}_9 \otimes_\rho \mathcal{M}_9), \tag{2.52}$$

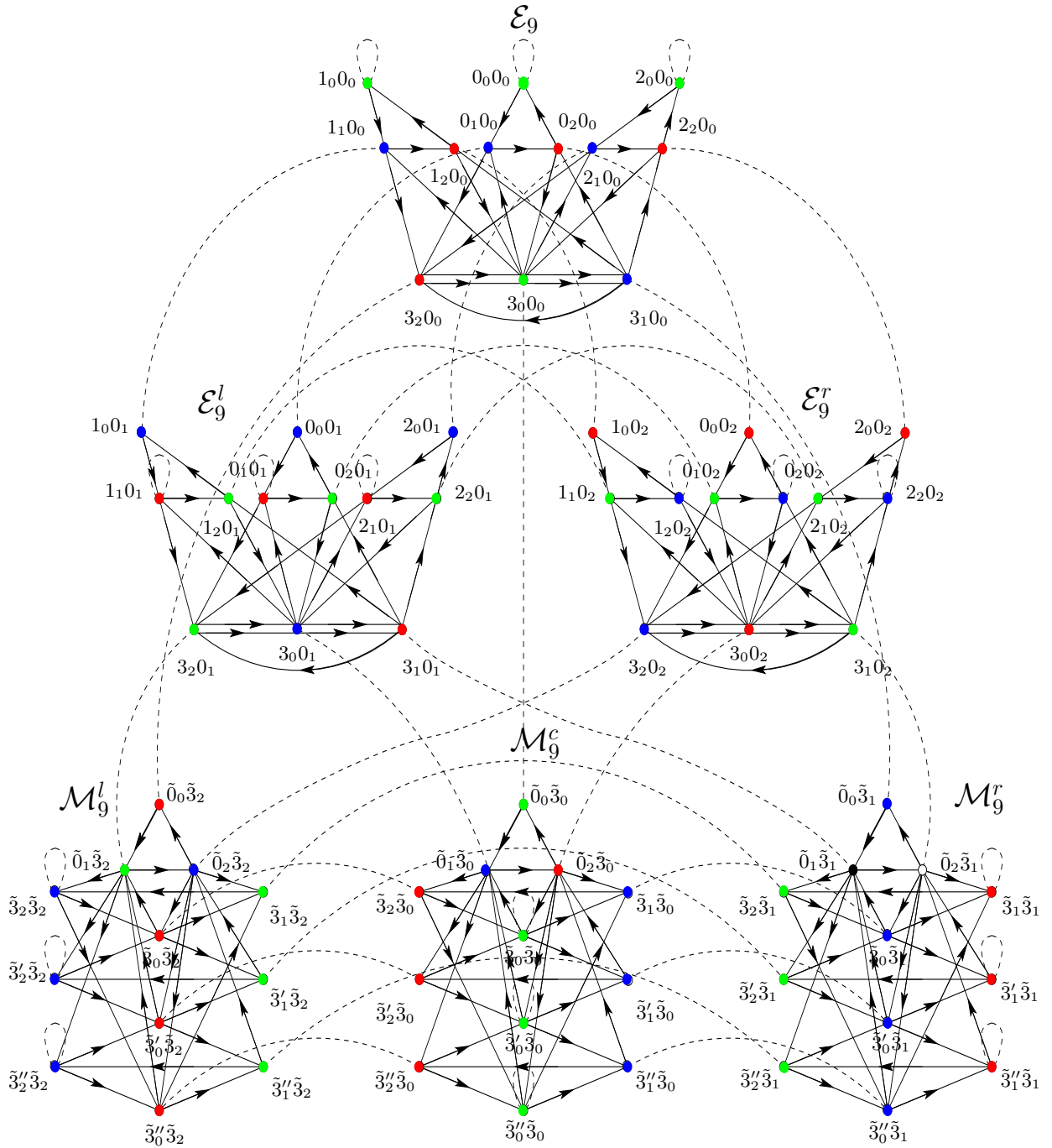


Figure 2.8: The Ocneanu graph  $Oc(\mathcal{E}_9) = Oc(\mathcal{M}_9)$ . The two left chiral generators are  $0_1 \otimes 0_0$  and  $0_2 \otimes 0_0$ , the two right chiral generators are  $0_0 \otimes 0_1$  and  $0_0 \otimes 0_2$ . The tensor product  $a \otimes b$  is denoted with the shorthand notation  $ab$ .

tel-00393835, version 1 - 9 Jun 2009



the quantum symmetry matrices read:

$$\begin{aligned}
O_{a \otimes 0_0} &= \begin{pmatrix} G_a & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & G_a & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & G_a & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & P_a^\ell & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & P_a^\ell & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & P_a^\ell \end{pmatrix} \\
O_{a \otimes 0_1} &= \begin{pmatrix} \cdot & G_a & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & G_a & \cdot & \cdot & G_a E_0 \\ G_a & \cdot & \cdot & G_a E_0 & \cdot & \cdot \\ \cdot & P_a^\ell E_0^{tr} & \cdot & \cdot & P_a^\ell (\mathbf{1} + P_{1_0}^\ell) & \cdot \\ \cdot & \cdot & P_a^\ell E_0^{tr} & \cdot & \cdot & P_a^\ell \\ \cdot & \cdot & \cdot & P_a^\ell (\mathbf{1} + P_{2_0}^\ell) & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \\
O_{a \otimes 0_2} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & G_a & \cdot & \cdot & \cdot \\ G_a & \cdot & \cdot & G_a E_0 & \cdot & \cdot \\ \cdot & G_a & \cdot & \cdot & G_a E_0 & \cdot \\ \cdot & \cdot & P_a^\ell E_0^{tr} & \cdot & \cdot & P_a^\ell (\mathbf{1} + P_{1_0}^\ell) \\ \cdot & \cdot & \cdot & P_a^\ell (\mathbf{1} + P_{2_0}^\ell) & \cdot & \cdot \\ \cdot & P_a^\ell E_0^{tr} & \cdot & \cdot & P_a^\ell & \cdot \end{pmatrix} \\
O_{\tilde{a} \otimes \tilde{3}_0} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & R_{\tilde{a}}^r & \cdot & \cdot \\ \cdot & R_{\tilde{a}}^r E_0^{tr} & \cdot & \cdot & R_{\tilde{a}}^r (\mathbf{1} + P_{1_0}^\ell) & \cdot \\ \cdot & \cdot & R_{\tilde{a}}^r E_0^{tr} & \cdot & \cdot & R_{\tilde{a}}^r (\mathbf{1} + P_{1_0}^\ell) \\ H_{\tilde{a}} & \cdot & \cdot & 2(H_{\tilde{a}} E_0) & \cdot & \cdot \\ \cdot & H_{\tilde{a}} (\mathbf{1} + G_{1_0}) & \cdot & \cdot & H_{\tilde{a}} E_0 & \cdot \\ \cdot & \cdot & H_{\tilde{a}} (\mathbf{1} + G_{1_0}) & \cdot & \cdot & H_{\tilde{a}} E_0 \end{pmatrix} \\
O_{\tilde{a} \otimes \tilde{3}_1} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & R_{\tilde{a}}^r & \cdot \\ \cdot & \cdot & R_{\tilde{a}}^r E_0^{tr} & \cdot & \cdot & R_{\tilde{a}}^r \\ \cdot & \cdot & \cdot & R_{\tilde{a}}^r (\mathbf{1} + P_{2_0}^\ell) & \cdot & \cdot \\ \cdot & H_{\tilde{a}} (\mathbf{1} + G_{2_0}) & \cdot & \cdot & H_{\tilde{a}} E_0 & \cdot \\ \cdot & \cdot & H_{\tilde{a}} & \cdot & \cdot & H_{\tilde{a}} E_0 \\ H_{\tilde{a}} & \cdot & \cdot & H_{\tilde{a}} E_0 & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \\
O_{\tilde{a} \otimes \tilde{3}_2} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & R_{\tilde{a}}^r \\ \cdot & \cdot & \cdot & R_{\tilde{a}}^r (\mathbf{1} + P_{2_0}^\ell) & \cdot & \cdot \\ \cdot & R_{\tilde{a}}^r E_0^{tr} & \cdot & \cdot & R_{\tilde{a}}^r & \cdot \\ \cdot & \cdot & H_{\tilde{a}} (\mathbf{1} + G_{2_0}) & \cdot & \cdot & H_{\tilde{a}} E_0 \\ H_{\tilde{a}} & \cdot & \cdot & H_{\tilde{a}} E_0 & \cdot & \cdot \\ \cdot & H_{\tilde{a}} & \cdot & \cdot & H_{\tilde{a}} E_0 & \cdot \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{2.60}$$

Triality  $t$  is well defined on this algebra:  $t(a_i \otimes 0_j) = t(\tilde{a}_i \otimes \tilde{3}_j) = i + j \pmod{3}$ . The left chiral subalgebra (by definition the algebra generated by the left chiral generator  $0_1 \otimes 0_0$ ) is  $L = \{a \otimes 0_0\}$ . The right chiral subalgebra (generated by  $0_0 \otimes 0_1$ ) is  $R = \{0_0 \otimes a\}$ . With the projections (2.53-2.58),  $R$  correspondonds to the set of elements  $\{0_0 \otimes 0_0, 1_0 \otimes 0_0, 2_0 \otimes 0_0, \tilde{0}_0 \otimes \tilde{3}_0, 0_0 \otimes 0_1, 1_0 \otimes 0_1, 2_0 \otimes 0_1, \tilde{0}_0 \otimes \tilde{3}_1, 0_0 \otimes 0_2, 1_0 \otimes 0_2, 2_0 \otimes 0_2, \tilde{0}_0 \otimes \tilde{3}_2\}$ . The ambichiral subalgebra (by definition the intersection of  $L$  and  $R$ ) is  $A = \{0_0 \otimes 0_0, 1_0 \otimes 0_0, 2_0 \otimes 0_0\}$ . The chiral operation  $C$  on the basis elements is defined by  $C(u \otimes v) = (v \otimes u)$ , for  $u, v \in H = \mathcal{E}_9 \oplus \mathcal{M}_9$  (and using the projections (2.53-2.58)). The self-dual elements obey  $C(u) = u$ , they are the

ones in figure 2.8 which are connected to themselves by the dashed line.  $A$ -elements are, in particular, self-dual.

**One modular invariant and two graphs** Starting from the modular invariant (2.41), we obtain the set of toric matrices  $W_{x0}$ , double fusion matrices  $V_{ij}$  and quantum symmetry matrices  $O_x$ , together with the corresponding Ocneanu graph. By an analysis of the later, it clearly appears that there are two graphs that are modules under the quantum symmetry algebra, the  $\mathcal{E}_9$  and  $\mathcal{M}_9$  graphs. Using the realization of the quantum symmetry algebra described above, the action is defined by:

$$Oc \times \mathcal{E}_9 \rightarrow \mathcal{E}_9 \quad \left\{ \begin{array}{l} (a \otimes 0_i) \cdot b = a \cdot 0_i \cdot b \\ (\tilde{a} \otimes \tilde{3}_i) \cdot b = \tilde{a} \cdot \tilde{3}_i \cdot b \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} S_{x=a \otimes 0_i}^{\mathcal{E}} = G_{0_i} G_a \\ S_{x=\tilde{a} \otimes \tilde{3}_i}^{\mathcal{E}} = R_{\tilde{3}_i} H_{\tilde{a}} \end{array} \right. \quad (2.61)$$

$$Oc \times \mathcal{M}_9 \rightarrow \mathcal{M}_9 \quad \left\{ \begin{array}{l} (a \otimes 0_i) \cdot \tilde{b} = a \cdot 0_i \cdot \tilde{b} \\ (\tilde{a} \otimes \tilde{3}_i) \cdot \tilde{b} = \tilde{a} \cdot \tilde{3}_i \cdot \tilde{b} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} S_{x=a \otimes 0_i}^{\mathcal{M}} = P_{0_i}^{\ell} P_a^{\ell} \\ S_{x=\tilde{a} \otimes \tilde{3}_i}^{\mathcal{M}} = R_{\tilde{3}_i} H_{\tilde{a}} \end{array} \right. \quad (2.62)$$

We have therefore two quantum groupoids associated with the initial modular invariant, constructed from the graphs  $\mathcal{E}_9$  and  $\mathcal{M}_9$ . Setting  $d_i^{\mathcal{E}} = \sum_{a,b} (F_i^{\mathcal{E}})_{ab}$ ,  $d_x^{\mathcal{E}} = \sum_{a,b} (S_x^{\mathcal{E}})_{ab}$ ,  $d_i^{\mathcal{M}} = \sum_{a,b} (F_i^{\mathcal{M}})_{ab}$ ,  $d_x^{\mathcal{M}} = \sum_{a,b} (S_x^{\mathcal{M}})_{ab}$ , we check the dimensional rules:

$$\dim(\mathcal{B}(\mathcal{E}_9)) = \sum_i (d_i^{\mathcal{E}})^2 = \sum_x (d_x^{\mathcal{E}})^2 = 518\,976 . \quad (2.63)$$

$$\dim(\mathcal{B}(\mathcal{M}_9)) = \sum_i (d_i^{\mathcal{M}})^2 = \sum_x (d_x^{\mathcal{M}})^2 = 754\,272 . \quad (2.64)$$

**The rejected diagram** In the first list of  $SU(3)$ -type graphs presented by Di Francesco and Zuber in [11], there were three graphs associated with the modular invariant (2.41):  $\mathcal{E}_9$ ,  $\mathcal{M}_9$  and another one, displayed on figure 2.9. This graph was later rejected by Ocneanu in [20], because some required cohomological property (written in terms of values for triangular cells) was not fulfilled. In other words, this graph gives rise to a module over the ring of  $\mathcal{A}_9$ , with the right properties, but the underlying category does not exist. Using our methods, this graph does not appear either. The reason is that it should be a module over the quantum symmetry algebra, but this is not the case: we can try to define such an action on this graph, but there is no solution when we impose the coefficients to be non-negative integers. In other words, imposing that a graph should define both a module over  $\mathcal{A}$  and a module over  $Oc$ , with the expected non-negativity properties, amounts to impose, at least for the members of the  $su(3)$  family, that both the module condition over  $\mathcal{A}$  (only), together with the self - cell condition, should be satisfied. The methods described here provide therefore also powerful checks for graphs that are candidates to be described by quantum groupoids associated with modular invariants.

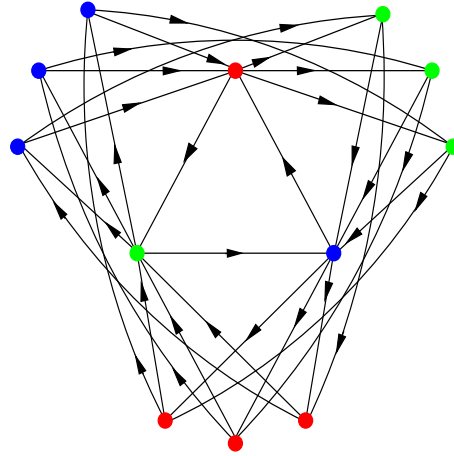


Figure 2.9: The rejected Di Francesco-Zuber graph.

**Final Comment** The Ocneanu graphs displayed in this paper ( $Oc(E_6)$ ,  $Oc(\mathcal{E}_5)$ ,  $Oc(\mathcal{E}_9)$ ) have been first obtained by Ocneanu himself. For instance those associated with members of the  $su(3)$  family were displayed on posters during the Bariloche conference (2000) but the full list never appeared in print. Several techniques [6, 25] allow one to recover some of them from the knowledge of the Di Francesco - Zuber diagrams. The present paper actually emerged from our wish to obtain the Ocneanu graphs  $Oc(G)$  (and the graphs  $G$  themselves, of course) from the only data provided by the modular invariant.

**Acknowledgments** The authors wish to thank R. Coquereaux for his suggestions, guidance, and help. G. Schieber was supported by a fellowship of Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) and of FAPERJ.



# Bibliography

- [1] R. E. Behrend, P. A. Pearce, V. Petkova, J.-B. Zuber, *Boundary Conditions in Rational Conformal Field Theories*, Nucl. Phys. **B579** (2000) 707–773.
- [2] J. Böckenhauer, D. E. Evans, Y. Kawahigashi, *Chiral structure of modular invariants for subfactors*, CMP 210 (2000), 733–784.
- [3] J. L. Cardy, *Boundary conditions, fusions rules and the Verlinde formula*, Nucl. Phys. **B324** (1989) 581–596.
- [4] R. Coquereaux, *Notes on the quantum tetrahedron*, hep-th/0011006, Moscow Math. J. vol2, n1, Jan.-March (2002), 1–40.
- [5] R. Coquereaux, G. Schieber, *Twisted partition functions for ADE boundary conformal field theories and Ocneanu algebras of quantum symmetries*, hep-th/0107001, J. of Geom. and Phys. 781, (2002), 1-43.
- [6] R. Coquereaux, G. Schieber, *Determination of quantum symmetries for higher ADE systems from the modular T matrix*. hep-th/0203242, J.Math.Phys. 44 (2003) 3809-3837.
- [7] R. Coquereaux, R. Trincherò, *On quantum symmetries of ADE graphs*, Advances in Theor. and Math. Phys., volume 8 issue 1 (2004), hep-th/0401140.
- [8] R. Coquereaux, E. Isasi, *On quantum symmetries of the non-ADE graph  $F_4$* , Adv. in Theo. Math. Phys. **8** (2004) 955-985, hep-th/0409201.
- [9] R. Coquereaux, D. Hammaoui, G. Schieber, E. H. Tahri, *Comments about quantum symmetries of  $SU(3)$  graphs*, J. of Geom. and Phys., in press,
- [10] R. Coquereaux, *Racah - Wigner quantum 6j Symbols, Ocneanu Cells for  $A_N$  diagrams, and quantum groupoids*, hep-th/0511293.
- [11] P. Di Francesco, J.-B. Zuber,  *$SU(N)$  Lattice integrable models associated with graphs*, Nucl. Phys **B338** (1990) 602–646;  *$SU(N)$  Lattice Integrable Models and Modular Invariance*, Recent Developments in Conformal Field Theories, Trieste Conference (1989), S. Randjbar-Daemi, E. Sezgin, J.-B. Zuber eds., World Scientific (1990).

- [12] D. E. Evans, D. R. Pinto, *Subfactor realization of modular invariants*, Commun. Math. Phys. **237** (2003) 309–363.
- [13] T. Gannon, *Modular data: the algebraic combinatorics of conformal field theory*, math.QA/0103044.
- [14] D. Hammaoui, G. Schieber, E.H. Tahri, *Higher Coxeter graphs associated to affine  $su(3)$  modular invariants*, J. of Physics **A 38** (2005) 8259–8286.
- [15] D. Hammaoui, G. Schieber, E.H. Tahri, *Quantum symmetries of the higher Coxeter graphs associated to affine  $su(3)$  modular invariants*, in preparation.
- [16] D. Hammaoui, PhD thesis, Université Mohamed I, Oujda.
- [17] A. Kirillov Jr, V. Ostrik, *On  $q$ -analog of McKay correspondence and ADE classification of  $sl(2)$  conformal field theories*, math.QA/0101219.
- [18] A. Ocneanu, *Paths on Coxeter diagrams: from Platonic solids and singularities to minimal models and subfactors*, notes taken by S. Goto, Fields Institute Monographs (Rajarama Bhat et al eds, AMS, 1999). Same title: talks given at the Centre de Physique Théorique, Luminy, Marseille, 1995.
- [19] A. Ocneanu, *Higher Coxeter systems*, Talk given at MSRI, <http://www.msri.org/publications/ln/msri/2000/subfactors/ocneanu>.
- [20] A. Ocneanu, *The Classification of subgroups of quantum  $SU(N)$* , Lectures at Bariloche Summer School 2000, Argentina, AMS Contemp. Math. **294**, R. Coquereaux, A. García and R. Trinchero eds.
- [21] V. Ostrik, *Module categories, weak Hopf algebras and modular invariants*, math.QA/0111139.
- [22] V.B. Petkova, J.-B. Zuber, *From CFT's to Graphs*, Nucl Phys. **B463** (1996) 161–193; *Conformal field theory and graphs*, Talk given at the 21st Intern. Coll. on Group Theor. Methods in Physics, Goslar, Germany, July 1996, hep-th/9701103.
- [23] V.B. Petkova, J.B. Zuber, *The many faces of Ocneanu cells*, Nucl. Phys. **B603** (2001) 449–496, hep-th/0101151.
- [24] V.B. Petkova, J.-B. Zuber, *Generalised twisted partition functions*, Phys. Lett. **B504** (2001) 157–164, hep-th/0011021.
- [25] G. Schieber, *L'algèbre des symétries quantiques d'Ocneanu et la classification des systèmes conformes à 2D*, PhD thesis (available in french and in portuguese, UP (Marseille) and UFRJ (Rio de Janeiro), Sept. 2003, math-ph/0411077.

- 
- [26] G. Schieber, *Bimodule structure and quantum symmetries: an exceptional affine  $su(4)$  example* in preparation.
- [27] R. Trincherro, *Quantum symmetries of faces models and the double triangle algebra*, hep-th/0501140.
- [28] J.-B. Zuber, *CFT, BCFT, ADE and all that*, Lectures at Bariloche Summer School, Argentina, Jan. 2000, AMS Contemp. Math. **294**, R. Coquereaux, A. García and R. Trincherro eds.



## Chapitre 3

# Symétries quantiques et graphes non-simplement lacés.

Il est possible dans certains cas de construire des restrictions sur le contenu des champs d'une théorie telles que la compatibilité avec une OPA soit maintenue, mais où l'invariance modulaire de la fonction de partition est remplacée par l'invariance sous l'action d'un sous-groupe du groupe modulaire [74][72][73]. Des exemples de ses restrictions sont fournies par les théories pour lesquels le graphe correspondant est issu d'un quotient par les groupes de symétrie  $\mathbb{Z}_2$  ou  $\mathbb{Z}_3$ . Ces quotients donnent naissance à des théories associées aux graphes non *ADE*, plus précisément aux graphes non-simplement lacés  $B_n$ ,  $C_n$ ,  $F_4$  et  $G_2$  pour les théories  $su(2)$  et leurs généralisations pour les théories  $su(3)$ .

Partant d'un candidat pour une fonction de partition, écrite en termes des éléments de l'algèbre de caractères de  $\hat{su}(n)_\ell$  au niveau  $\ell$ , la méthode de scission modulaire décrite dans la section précédente permet d'explorer les propriétés algébriques qui, éventuellement, conduisent à des structures de type "symétries quantiques". On sait déjà, pour des raisons très générales, qu'il ne sera pas possible d'associer, aux exemples non simplement lacés, des groupoïdes quantiques, comme ceux que nous avons succinctement décrits antérieurement. Mais on peut néanmoins étudier explicitement ce type de modèles, déterminer la structure de ce qui devrait être leur algèbre de symétries quantiques, et analyser ce qui change par rapport à la situation simplement lacée. Outre l'intérêt mathématique de ces activités exploratoires, il faut signaler que les modèles considérés peuvent apparaître dans plusieurs domaines de la physique, comme les théories des super cordes, les théories des branes ou les systèmes intégrables.

Dans ce chapitre, sont présentés les résultats de cette exploration des symétries quantiques pour les graphes non-simplement lacés. Le travail est basé sur les méthodes et les résultats de l'exemple  $F_4$  qui est étudié dans [25], cette dernière référence est à la fois le premier traitement d'un cas non-simplement lacé, et le cas grâce auquel l'auteur a pu généraliser la méthode de scission modulaire aux graphes du système  $SU(3)$ .

La première section contient des considérations générales sur les méthodes et résultats concernant les graphes non-simplement lacés du système  $SU(2)$ . Nous décrivons la méthode d'obtention des fonctions de partition des graphes non-simplement lacés par restriction de celles des graphes  $ADE$ , la méthode de scission modulaire adaptée à l'étude des graphes  $SU(2)$  non-simplement lacés et finalement les résultats généraux. La deuxième section est dédiée à l'étude explicite des exemples du système  $SU(2)$ ; on considère explicitement les cas  $F_4$ ,  $B_3$ ,  $B_4$ , le cas général  $B_n$  et le graphe  $G_2$ . Dans chaque cas nous calculons l'ensemble des matrices toriques, l'algèbre de symétries quantiques et on explore de quelle façon la règle de somme quadratique doit être modifiée. La troisième section contient l'étude d'un cas non-simplement lacé du système  $SU(3)$  ce cas est construit comme l'analogie de l'exemple  $F_4$  de  $SU(2)$ , mais les résultats ne constituent pas une généralisation directe du cas  $SU(2)$ , principalement à cause du caractère orienté des graphes de  $SU(3)$  et du fait que les multiples liens sont déjà présents dans les graphes de Di Francesco Zuber.

### 3.1 Considérations générales.

#### 3.1.1 Pliage des graphes $ADE$ , fonctions de partition et propriétés modulaires des graphes non-simplement lacés.

La donnée de départ est l'invariant modulaire d'un graphe  $ADE$ . Dans notre approche, la fonction de partition d'un graphe non-simplement lacé ( $\mathcal{G}$ ) est obtenue comme la restriction (en contenu de caractères) de la fonction de partition d'un graphes  $ADE$  de même norme que  $\mathcal{G}$ . La restriction étant telle que les caractères gardés sont étiquetés par les exposants du graphe non-simplement lacé en question. Ce nouveau pseudo-invariant modulaire est alors pris comme candidat que on doit pouvoir associer aux symétries quantiques d'un graphe non simplement lacé.

Pour comprendre cette restriction, on va considérer le mécanisme de construction des graphes non simplement lacés à partir du pliage des graphes  $ADE$ . La Figure 3.1 illustre l'action des groupes finis  $\mathbb{Z}_2$  et  $\mathbb{Z}_3$  sur des différents graphes  $ADE$  de  $SU(2)$ . Le quotient d'un graphe  $ADE$  (noté  $G$ ) par le groupe fini approprié donne origine à un graphe non-simplement lacé  $\mathcal{G}$ . Ainsi le graphe  $F_4$  de nombre de Coxeter 12 provient du quotient par  $\mathbb{Z}_2$  du graphe exceptionnel  $E_6$ , le graphe  $G_2$  est le quotient par  $\mathbb{Z}_3$  du graphe  $D_4$ , la série  $B_n$  de nombre de Coxeter  $2n$  est associée au quotient par  $\mathbb{Z}_2$  des graphes  $A_{2n-1}$ , et les graphes  $C_n$  sont construits à partir de quotients par  $\mathbb{Z}_2$  des graphes  $D_{n+1}$ .

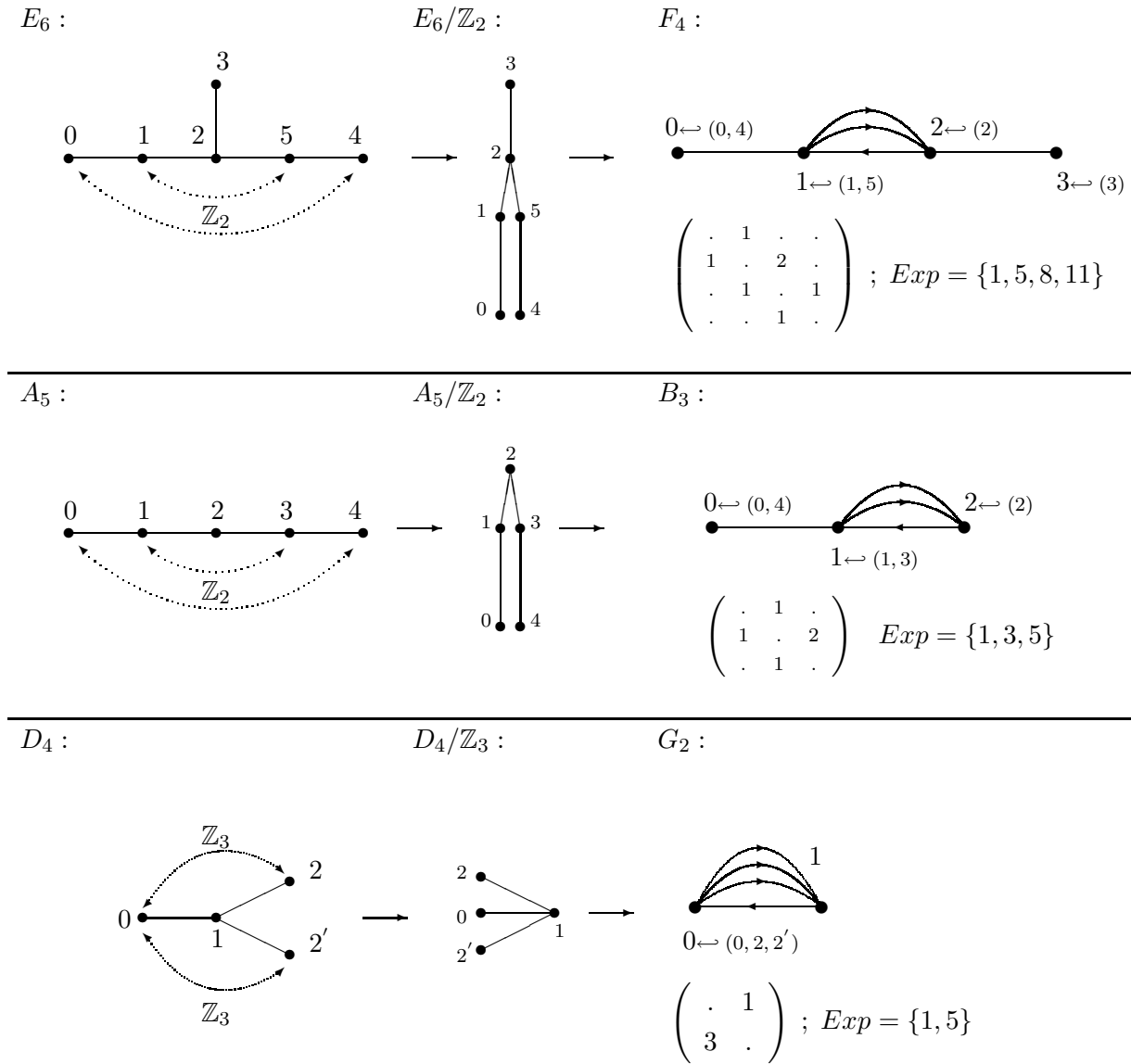


FIG. 3.1 – Pliages  $\mathbb{Z}_2$  et  $\mathbb{Z}_3$  des graphes ADE de  $SU(2)$ .

Chaque vertex du graphe plié est étiqueté par les vertex du graphe  $G$  identifiés par l'action du groupe (label à gauche), il est aussi étiqueté par le nouveau label correspondant à l'ordre des vertex dans la matrice d'adjacence (label à droite).

Les flèches en lignes pointillées indiquent l'action du groupe sur les vertex du graphe  $G$ , les points sans flèches sont les vertex invariants. Le lien entre la série des graphes présentés dans la Figure 3.1 et les graphes de Dynkin-Coxeter est fournie par la matrice de Cartan [45] [2]. En terme de matrices d'adjacence, les matrices de Cartan des graphes de la Figure 3.1 sont données par la relation

$$C = 2\mathbf{1} - Ad(\mathcal{G}).$$

Si  $\mathcal{G}$  est un graphe non simplement lacé, construit comme un quotient du graphe ADE  $G$ , alors les entrées de la matrice d'adjacence de  $\mathcal{G}$  est donnée par la équation suivante

$$Ad(\mathcal{G})_{ij} = \frac{\text{nombre d'arêtes de } G \text{ liant } i \text{ à } j}{\text{nombre vertex de } G \text{ identifiées au vertex } j}$$

(nous faisons référence aux vertex du graphe  $G$  identifiés par l'action de  $A$ )

Notons que les matrices obtenues ne sont pas symétriques, et c'est d'ailleurs là que réside la différence fondamentale avec le cas simplement lacé (pour le cas du système  $Su(2)$ ). Les caractères du graphe  $\mathcal{G}$  forment un sous-ensemble de l'ensemble des caractères du graphe ADE, la fonction de partition associée au graphe non-simplement lacé est alors la restriction de la fonction de partition du graphe  $G$  aux caractères étiquetés par les exposants du graphe non-simplement lacé. Ces exposants sont aussi listés dans la Figure 3.1. Notons que dans la procédure conduisant à l'obtention des graphes non-simplement lacés (par exemple  $B_3$  à partir de  $A_5$ ), nous n'avons pas dupliqué le point fixe de la transformation (le vertex 2 de  $A_5$ ). Le dédoublement du vertex fixe nous ramène aux cas orbifolds simplement lacés (par exemple  $D_4$  à partir de  $A_5$  à la place de  $B_3$ ). Cette remarque peut également être généralisée au cas des graphes de type  $SU(3)$ .

**Propriétés modulaires.** La fonction de partition d'un graphe non-simplement lacé construit par un quotient d'un graphe ADE est invariante uniquement sous l'action d'un sous-groupe de congruence de type  $\Gamma_0(2)$  ou  $\Gamma_0(3)$  du groupe modulaire. Le sous-groupe  $\Gamma_0(N)$  est le groupe de matrices  $2 \times 2$  suivant

$$\Gamma(N) \supset \Gamma_0(N) = \left\{ \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \mid \{a, b, c, d\} \in \mathbb{Z}, \quad c = 0 \pmod{N} \text{ et } ad - bc = 1 \right\}$$

où  $\Gamma(N)$  est le sous groupe de congruence principal du groupe  $SL(2, \mathbb{Z})$ .  $\Gamma_0(N)$  a deux générateurs, le générateur de groupe modulaire  $T$  et l'opérateur  $(S^{-1}T^{-N}S)$  qui agit sur le paramètre complexe  $\tau$  comme suit (rappelons que  $S : \tau \rightarrow -\frac{1}{\tau}$ , et  $T : \tau \rightarrow \tau + 1$ )

$$(S^{-1}T^{-N}S) : \tau \rightarrow \frac{\tau}{1 + N\tau}$$

L'action de  $T$  et  $S^{-1}T^{-N}S$  sur les caractères  $\chi_i(\tau)$  peut-être calculée à travers la dépendance dans le paramètre  $\tau$ , ou de manière matricielle en utilisant la représentation de Hurwitz-Verlinde de la dimension adéquate des générateurs  $S$  et  $T$ .

Comme pour les graphes ADE, la fonction de partition de  $\mathcal{G}$  s'écrit

$$Z = \sum_{ij \in \text{exp}(\mathcal{G})} \bar{\chi}_i(\tau) M_{ij} \chi_j(\tau) \quad (3.1)$$

La matrice  $M$  est appelée la *matrice modulaire* (et non plus l'invariant modulaire). L'invariance de la fonction de partition par  $\Gamma_0(N)$  peut-être vérifiée simplement par les relations de commutation

$$[M, T] = 0 \quad , \quad [M, (S^{-1}T^{-N}S)] = 0$$

### 3.1.2 La méthode de scission modulaire et les symétries quantiques des graphes non-simplement lacés.

L'analyse de l'équation de scission modulaire appliquée à une matrice modulaire associée à un graphe non-simplement lacé exige des modifications de l'analyse de la décomposition des matrices  $K_{i,j}$  en termes des matrices toriques  $W_{x,0}$  et  $W_{0,x}$ .

Une première observation est que la correspondance entre  $Tr(MM^\dagger)$  et la dimension de l'algèbre de symétries quantiques n'est plus satisfaite. Nous ne connaissons pas a priori, combien de noeuds a le graphe de symétries quantiques, et par conséquent comment décomposer les matrices toriques quand il y a multiplicité.

Cette première observation n'est pas déconnectée de la deuxième puisque cette dernière concerne l'interprétation de la multiplicité des matrices toriques. On considère l'équation de scission modulaire (2.9) pour un cas *ADE* avec multiplicité (une matrice torique est associée à plus d'un point du graphe  $Oc(G)$ ). L'index  $\hat{z}$  désigne ces matrices toriques différentes, tandis que l'index  $z$  étiquette les vertex du graphe de symétries quantiques. Dû à la multiplicité des matrices toriques nous avons la relation  $\hat{z} \leq z$  et l'équation de scission modulaire peut s'écrire comme suit

$$K_{ij} = \sum_{\hat{z}} n_{\hat{z}} (W_{0,\hat{z}})_{ij} W_{\hat{z},0}$$

où  $n_{\hat{z}}$  est la multiplicité de la matrice  $W_{\hat{z},0}$ . Il faut souligner que la somme ici est faite sur les matrices toriques et non sur les noeuds du graphe de symétries quantiques comme dans l'équation (2.9).

Toujours pour les cas *ADE* il a été montré [57] que l'entrée  $(W_{z0})_{ij}$  d'une matrice torique donne le nombre de chemins essentiels entre l'origine du graphe  $Oc(G)$  et le vertex  $z$  (le pair d'index  $(i, j)$  indique le nombre de pas effectués dans chaque partie chirale du graphe). Puisque le graphe est simplement lacé, le nombre de chemins en sens retour doit être égal au nombre en sens aller, d'où la relation  $W_{z,0} = W_{0,z}$ .

Pour un graphe non-simplement lacé cette même interprétation des matrices toriques amène à considérer les coefficients  $n_z$  d'une manière différente. Un graphe non-simplement lacé peut-être associé à un graphe de symétries quantiques non-simplement lacé, dans ce cas le nombre des chemins essentiels allant de l'origine à un point  $z$  ne est pas forcément le même que le nombre de chemins essentiels dans le sens opposé. Dans ce cas, en admettant que les matrices toriques donnent un comptage des chemins essentiels sur  $Oc(G)$ , la relation suivante est consistante avec notre interprétation :

$$(W_{0,\hat{z}})_{ij} = n_{\hat{z}} (W_{\hat{z},0})_{i^*j^*}. \quad (3.2)$$

L'équation (2.13) permettant de calculer la norme de  $K_{ij}$  s'écrit maintenant :

$$(K_{ij})_{i^*j^*} = \sum_{\hat{z}} n_{\hat{z}} |(W_{0,\hat{z}})_{ij}|^2. \quad (3.3)$$

L'analyse de la décomposition des matrices  $K_{ij}$  en fonction de sa norme reste inchangée, sauf pour les matrices  $K_{ij}$  divisibles par une constante  $n_z \geq 2$ . Ces matrices ne seront plus considérées comme la somme de  $n_x$  matrices égales (multiplicité) mais comme une seule matrice torique satisfaisant la relation (3.2). Avec cet interprétation la dimension de l'algèbre de symétries quantiques est égale au nombre de matrices toriques différents, l'équation de scission modulaire redevient simplement

$$K_{ij} = \sum_{z \in Oc(\mathcal{G})} (W_{0,z})_{ij} W_{z,0}.$$

Comme la dimension de l'algèbre de symétries quantiques n'est pas connue à priori, il ne nous est pas possible de déterminer laquelle parmi ces deux interprétations donne une solution compatible avec une généralisation des structures de Hopf faibles apparaissant dans les cas *ADE*. En conséquence, pour les graphes non-simplement lacés qui conduisent à une solution de l'équation de scission modulaire incluant des coefficients  $n_x$  plus grands que un, deux possibilités seront étudiées :

- La solution incluant des multiplicités de matrices toriques (comme dans le cas *ADE*) est associée à un graphe d'Ocneanu simplement lacé. Le graphe non-simplement lacé  $\mathcal{G}$  associé à la matrice modulaire est dans ce cas un module sur le graphe  $Oc(\mathcal{G})$ .  $Oc(\mathcal{G})$  est toujours l'union de deux graphes chiraux sur le même ensemble de vertex, avec deux matrices d'adjacence (une pour chaque partie chiral) notées  $V_{1,0}$  et  $V_{0,1}$ . S'il y a des coefficients  $n_z \geq 2$ , les matrices d'adjacence  $V_{1,0}$  et  $V_{0,1}$  ne sont pas totalement fixées par l'équation de scission modulaire généralisée<sup>1</sup>. Le choix des coefficients libres correspond à un choix d'ordre des vertex non-discernables de  $Oc(\mathcal{G})$ .
- La solution considérant valable la relation 3.2 résulte dans certains cas des graphes de symétrie quantiques non-simplement lacés (c'est le cas des exemples  $F_4$  et  $G_2$ ). Dans ce cas les matrices d'adjacence  $V_{1,0}$  et  $V_{0,1}$  n'ont pas de coefficients indéterminés. Si le graphe de symétries quantiques est effectivement non-simplement lacé, un graphe de Coxeter-Dynkin non-simplement lacé de même norme que  $\mathcal{G}$  (pas forcément  $\mathcal{G}$  lui même) apparaît comme sous graphe module de  $Oc(\mathcal{G})$ .

Le graphe  $Oc(\mathcal{G})$  est le graphe de Cayley de la multiplication par les générateurs, et ces vertex forment l'algèbre des symétries quantiques  $Oc(\mathcal{G})$ . Les matrices à coefficients  $O_x$ , définies par les constantes de structure de l'algèbre, forment une représentation de l'algèbre de symétries quantiques.

**Actions de module et règle de somme quadratique.** Dans le système *ADE* la bigèbre  $\mathcal{B}$  est la structure formelle qui donne origine à toutes les propriétés algébriques (notamment

<sup>1</sup>En général la solution de l'équation de scission modulaire n'est pas unique, mais une seule de ses solutions est compatible avec un graphe de symétries quantiques fournissant une algèbre de graphe et un module sur le graphe  $G$ . Notre discussion dans ce paragraphe se limite à ce type de solutions.

les propriétés de module et algèbre de graphe) liant les trois graphes :  $G$ ,  $\mathcal{A}(G)$  et  $Oc(G)$ . On a vu dans le premier chapitre que cette théorie est bien établie (bien qu'elle n'ait été explicitée que pour quelques exemples *ADE* très simples) [19],[20][28], mais pour les graphes non-simplement lacés elle n'existe pas. Cependant dans chaque exemple non-simplement lacé nous avons observé les propriétés fondamentales qui suggèrent de l'existence de  $\mathcal{B}$ , qui constituerait une généralisation de la structure de grupoïde quantique généralement associé aux graphes simplement lacés.

- Tout d'abord  $Oc(G)$  "existe", en ce sens que nous pouvons le déterminer en résolvant les équations de scission modulaire.
- $\mathcal{G}$  est un module sur  $\mathcal{A}(\mathcal{G})$ , l'action de  $\mathcal{A}(\mathcal{G})$  sur  $\mathcal{G}$  est codée par les matrices à entrées entiers-positif  $F_i$ . Ces matrices forment une représentation  $d_{\mathcal{G}} \times d_{\mathcal{G}}$  de l'algèbre commutative  $\mathcal{A}(\mathcal{G})$  de type  $A$  usuelle.
- $\mathcal{G}$  est un module sur  $Oc(\mathcal{G})$ , l'action de  $Oc(\mathcal{G})$  est codée par les matrices d'entrées entiers-positif  $S_x$ . Ces matrices forment une représentation de dimension  $d_{\mathcal{G}}$  de l'algèbre  $Oc(\mathcal{G})$ .
- $Oc(\mathcal{G})$  est un bimodule sur  $\mathcal{A}(\mathcal{G})$  dont les constantes de structure sont les matrices toriques à entrées entières non négatives, et la condition de compatibilité est l'équation de scission modulaire.

Par contre la règle de somme quadratique, qui résulte de l'existence des deux structures d'algèbres sur deux espaces vectoriels isomorphes, doit être corrigée par des facteurs entiers très simples. Il est en effet intéressant d'explorer les règles de somme vérifiées par les familles de graphes  $\mathcal{G}$ ,  $\mathcal{A}(\mathcal{G})$  et  $Oc(\mathcal{G})$ . Ceci permet de suggérer certaines propriétés pour la structure formelle qu'on devrait pouvoir associer aux graphes non-simplement lacés. Les dimensions de type  $\mathcal{A}(\mathcal{G})$  et  $Oc(\mathcal{G})$  sont calculées par les relations usuelles

$$d_i = \sum_{a,b \in \mathcal{G}} (F_i)_{ab} \quad , \quad d_z = \sum_{a,b \in \mathcal{G}} (S_z)_{ab}.$$

Les relations entre les sommes des carrés des dimensions de type  $\mathcal{A}(\mathcal{G})$  et de type  $Oc(\mathcal{G})$  dépendent de l'interprétation donnée au coefficient  $n_x$ .

- Si  $n_x$  correspond à la multiplicité des matrices toriques, et si notre graphe de symétries quantiques est (exclusivement) simplement lacé, alors

$$\sum_{x \in Oc(\mathcal{G})} d_x^2 = \mathcal{N} \times \sum_{i \in \mathcal{A}(\mathcal{G})} d_i^2. \quad (3.4)$$

- Si  $n_x$  correspond au coefficient dans l'équation (3.2), et si notre graphe de symétries quantiques admet des sous graphes non-simplement lacé, alors

$$\sum_{x \in Oc(\mathcal{G})} \frac{1}{n_x} d_x^2 = \mathcal{N} \times \sum_{i \in \mathcal{A}(\mathcal{G})} d_i^2 \quad (3.5)$$

où le facteur  $\mathcal{N}$  est le nombre d'éléments du groupe fini  $\mathbb{Z}_{\mathcal{N}}$  qui intervient dans la construction de  $\mathcal{G}$  à partir du graphe *ADE*  $G$ .

En conclusion la règle de somme quadratique usuelle marche presque. Les candidats pour les deux algèbres de caractères associés aux deux structures multiplicatives semi-simples sur les deux algèbres qui doivent remplacer  $\mathcal{B}$ , sont respectivement l'algèbre  $Oc(\mathcal{G})$  et la somme directe de deux copies de l'algèbre de graphe  $\mathcal{A}(\mathcal{G})$ . Le facteur  $\frac{1}{n_x}$  qui apparaît dans l'équation (3.5) est naturel, du fait de la présence, dans la base de l'algèbre de symétries quantiques, d'éléments  $z$  avec deux longueurs, correspondant aux racines longues et courtes du graphe non-simplement lacé.

**Commentaires sur les exemples  $SU(3)$ .** Pour la construction des exemples non-simplement lacés du système  $SU(3)$  on ne peut pas utiliser l'information apportée par les exposants de Dynkin des graphes en question, puisque les graphes eux-mêmes ne sont pas à priori connus (certains candidats sont proposés [72][73]). Pour cette raison l'étude du pliage des graphes  $SU(2)$  est utilisée pour fournir des constructions analogues dans le système  $SU(3)$ . Par exemple, on observe que dans la restriction de la fonction de partition de  $E_6$  qui mène à la fonction de partition de  $F_4$ , on a gardé uniquement les caractères associés à des vertex de  $E_6$  qui sont envoyés au vertex "0" du nouveau graphe, lorsqu'on prend le quotient par  $\mathbb{Z}_2$ .

Pour obtenir une matrice modulaire qui nous serve de point de départ, et qui puisse être associé à un graphe non simplement lacé de  $SU(3)$  nous procéderons en ne gardant que les caractères reliés à l'identité lorsqu'on effectue le quotient par le groupe discret approprié : le graphe  $\mathcal{E}_5$  de la famille  $SU(3)$  est un analogue du graphe  $E_6$ , nous noterons ainsi le graphe quotient par  $\mathcal{F}_5$ .

### 3.2 Étude explicite des graphes non-simplement lacés de $SU(2)$ .

Pour les cas  $SU(2)$ , les graphes non-simplement lacés recherchés sont connus :  $F_4$ ,  $G_2$ ,  $B_n$  et  $C_n$ . Ceci signifie qu'on connaît les propriétés du graphe de Coxeter  $\mathcal{G}$  que sera associé à une fonction de partition restreinte.

#### 3.2.1 Le cas $F_4$ .

Le cas  $F_4$  a été le premier à être traité parmi les cas non-simplement lacés, le graphe et sa matrice d'adjacence sont montrés dans la Figure 3.1, la norme du graphe est  $\beta = \cos(\frac{\pi}{\kappa})$  avec nombre de Coxeter  $\kappa = 12$ ,  $F_4$  a donc même nombre de Coxeter que les graphes  $A_{11}$ ,  $D_7$  et  $E_6$ . Les exposants du graphe sont  $\{1, 5, 7, 11\}$ , ils forment un sous-ensemble des exposants du graphe  $E_6$  qui sont les suivantes  $\{1, 4, 5, 7, 8, 11\}$ . Le graphe  $F_4$  est obtenu par le pliage  $\mathbb{Z}_2$  du graphe  $E_6$ , comme est illustré dans la Figure 3.1. L'action du groupe sur les vertex de  $E_6$  est définie par l'automorphisme  $\mathbb{Z}_2$  comme suit

$$A(2) = 2 \quad ; \quad A(3) = 3$$







$$W_{6,0} = (W_{1,0})^T; \quad W_{12,0} = (W_{2,0})^T; \quad W_{16,0} = (W_{3,0})^T; \quad W_{11,0} = (W_{4,0})^T \\ W_{13,0} = (W_{8,0})^T \quad W_{17,0} = (W_{9,0})^T \quad \hat{W}_{18,0} = (\hat{W}_{15,0})^T.$$

La notation  $\hat{W}_{x,0}$  identifie les matrices toriques apparaissant avec coefficient 2 dans l'expansion des  $K_{ij}$ . Les matrices  $W_{0,0}, W_{5,0}, W_{7,0}, W_{10,0}, \hat{W}_{14,0}, \hat{W}_{19,0}$  sont symétriques (auto-duale), parmi elles il y a deux matrices,  $W_{0,0}$  et  $W_{5,0}$ , correspondant aux vertex ambichiraux de l'algèbre de symétries quantiques.

### Le graphe d'Ocneau et l'algèbre de symétries quantiques.

Le fait qu'il y ait quatre matrices toriques avec un coefficient  $n_z$  égal à deux implique que il y a deux candidats pour l'algèbre de symétries quantiques, comme on l'a déjà expliqué dans les section 3.1.

**S1.** Première solution<sup>2</sup> : Nous postulons la relation  $W_{0,z} = n_z W_{z,0}$ , on peut alors oublier la distinction  $\hat{W}$  et écrire l'ensemble complet des matrices toriques :

$$W_{z,0} = n_z W_{0,z} \text{ avec } \begin{cases} n_z = 1 \text{ pour } z = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 16, 17\} \\ n_z = 2 \text{ pour } z = \{14, 15, 19, 18\} \end{cases}$$

La dimension de l'algèbre de symétries quantiques est  $d_O = 20$ , la solution de l'équation (2.10) pour la paire d'index  $(i, j)$  fixes à  $(1, 0)$  et  $(0, 1)$  donne les deux générateurs chiraux  $V_{10}$  et  $V_{01}$ , qui, dans l'ordre que nous avons choisi pour les matrices toriques, ont la forme suivante :

$$V_{10} = \begin{pmatrix} \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & 1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$$

<sup>2</sup>Cette solution est décrite en détail dans l'article publié : [25]



Les vertex du graphe d'Ocneanu sont les éléments de la base de l'algèbre de symétries quantiques, cette algèbre est générée par deux générateurs dénotés par  $\underline{1}$  et  $\underline{1}'$ . La partie chirale gauche (en bleue) est le graphe de Cayley de la multiplication des éléments de  $Oc(F_4)$  par le générateur  $\underline{1}$  (correspondant à la matrice  $V_{10}$ ). La partie chirale droite (en rouge) est le graphe de Cayley de la multiplication par le générateur  $\underline{1}'$  (correspondant à la matrice  $V_{01}$ ). Pour chaque graphe chirale le premier sous graphe (de type  $E_6$ ) est une sous-algèbre de graphe appelé le **sous algèbre chirale**. La sous algèbre chirale gauche est engendrée par les vertex  $\{\underline{0}, \underline{1}, \underline{2}, \underline{5}, \underline{4}, \underline{3}\}$  et est générée par  $\underline{1}$ . La sous algèbre chirale droite est engendrée par les vertex  $\{\underline{0}, \underline{1}', \underline{2}', \underline{5}', \underline{4}', \underline{3}'\}$  et est générée par  $\underline{1}'$ .

Considérons le graphe chirale gauche. Le deuxième sous graphe de type  $E_6$  (noté  $e$ ) est engendré par les vertex  $\{\underline{1}', \underline{11}', \underline{21}', \underline{51}', \underline{5}', \underline{31}'\}$ , il constitue un module sur la sous algèbre chirale gauche  $E$ . Les troisième et quatrième sous graphes, notés  $F$  et  $f$ , sont engendrés par les ensembles de vertex  $\{\underline{32}', \underline{22}', \underline{12}', \underline{2}'\}$  et  $\{\underline{33}', \underline{23}', \underline{13}', \underline{3}'\}$  respectivement, ces sous-graphes sont aussi des modules de type  $F_4$  sur la sous algèbre chirale gauche.

Grâce à la symétrie présente entre la partie chirale gauche et droite, nous savons que la structure est identique pour le graphe chirale droit.

L'algèbre de symétries quantiques est donnée par  $Oc(F_4) = E_6 \otimes_J E_6$ , où  $\otimes_J$  est le produit tensoriel pris sur la sous-algèbre  $J = \text{gen}\{\underline{0}, \underline{4}\}$ . Les vertex du graphe d'Ocneanu sont étiquetés comme  $x = \underline{a}b' = a \otimes_J b$ . Le produit tensoriel  $\otimes_J$  comprend les identifications suivantes  $a * u \otimes_J b = a \otimes_J u * b$  pour tout  $u \in J$ . Alors les vingt éléments de la base de  $Oc(F_4)$  sont :

$$\begin{array}{l}
 \underline{0} = \underline{0} \otimes_J \underline{0} = \underline{4} \otimes_J \underline{4} = \underline{0} \\
 \underline{1} \otimes_J \underline{0} = \underline{5} \otimes_J \underline{4} = \underline{1} \qquad \underline{0} \otimes_J \underline{1} = \underline{4} \otimes_J \underline{5} = \underline{1}' \\
 \underline{2} \otimes_J \underline{0} = \underline{2} \otimes_J \underline{4} = \underline{2} \qquad \underline{0} \otimes_J \underline{2} = \underline{4} \otimes_J \underline{2} = \underline{2}' \\
 \underline{3} \otimes_J \underline{0} = \underline{3} \otimes_J \underline{4} = \underline{3} \qquad \underline{0} \otimes_J \underline{3} = \underline{4} \otimes_J \underline{3} = \underline{3}' \\
 \underline{5} \otimes_J \underline{0} = \underline{1} \otimes_J \underline{4} = \underline{5} \qquad \underline{0} \otimes_J \underline{5} = \underline{4} \otimes_J \underline{1} = \underline{5}' \\
 \underline{4} \otimes_J \underline{0} = \underline{0} \otimes_J \underline{4} = \underline{4} \\
 \underline{1} \otimes_J \underline{1} = \underline{5} \otimes_J \underline{5} = \underline{11}' \\
 \underline{5} \otimes_J \underline{1} = \underline{1} \otimes_J \underline{5} = \underline{15}' \\
 \underline{2} \otimes_J \underline{1} = \underline{2} \otimes_J \underline{5} = \underline{21}' \qquad \underline{2} \otimes_J \underline{2} = \underline{22}' \qquad \underline{1} \otimes_J \underline{2} = \underline{5} \otimes_J \underline{2} = \underline{12}' \\
 \underline{3} \otimes_J \underline{1} = \underline{3} \otimes_J \underline{5} = \underline{31}' \qquad \underline{1} \otimes_J \underline{3} = \underline{5} \otimes_J \underline{3} = \underline{13}' \\
 \underline{3} \otimes_J \underline{2} = \underline{32}' \qquad \underline{2} \otimes_J \underline{3} = \underline{23}' \\
 \underline{3} \otimes_J \underline{3} = \underline{33}'
 \end{array}$$

où la représentation graphique de la table précédente permet d'identifier les vertex gauches, droites et ambichiraux.

Le produit obtenu dans  $Oc(F_4)$  peut s'écrire comme  $(a \otimes_J b)(c \otimes_J d) = ac \otimes_J bd$  où  $ab$  est le produit de l'algèbre de graphe  $E_6$  (voir table 3.3), la table de multiplication par blocs de

l'algèbre de symétries quantiques est illustrée ci-dessous :

$\times$	$E$	$e$	$F$	$f$
$E$	$E$	$e$	$F$	$f$
$e$	$e$	$E + F$	$e + f$	$F$
$F$	$F$	$e + f$	$E + F$	$e$
$f$	$f$	$F$	$e$	$E$

où chaque bloc  $E$ ,  $e$ ,  $F$  ou  $f$  permet d'indiquer la table de multiplication de l'action de  $E_6$  sur chaque sous graphe.

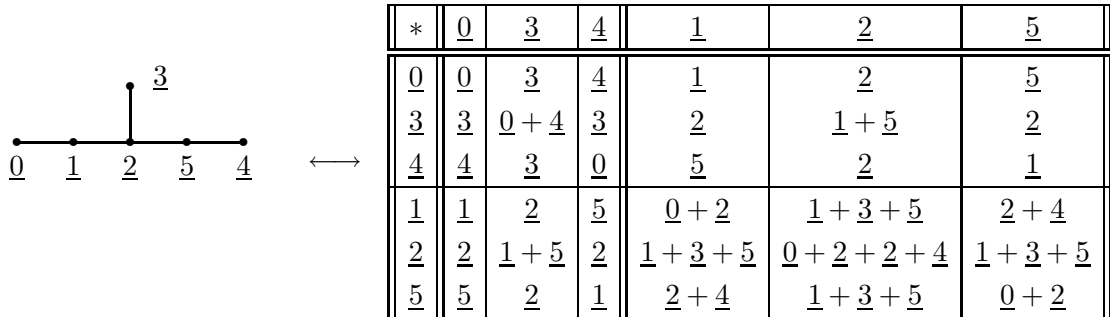


FIG. 3.3 – Table de multiplication de  $E_6$

Une représentation matricielle de dimension  $20 \times 20$  de l'algèbre de symétries quantiques est donnée par les matrices  $O_x$ . Ces matrices sont les constantes de structure de l'algèbre (voir [25]) et elles peuvent être calculées à partir des relations de récurrence du graphe  $O_c(F_4)$  comme suit :

$$\begin{array}{l}
 O_0 = \mathbb{I}_{11} \\
 O_1 = V_{10} \\
 O_2 = O_1^2 - O_0 \\
 O_4 = O_1^4 - 4O_1^2 + 2O_0 \\
 O_5 = O_1 \cdot O_4 \\
 O_3 = O_2 \cdot O_1 - O_5 - O_1
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 O_{1'} = V_{01} \\
 O_{11'} = O_1 \cdot O_1 \\
 O_{21'} = O_2 \cdot O_{1'} \\
 O_{31'} = O_3 \cdot O_{1'} \\
 O_{15'} = O_5 \cdot O_{1'} \\
 O_{5'} = O_5 \cdot O_{1'}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 O_{2'} = O_{1'}^2 - O_0 \\
 O_{12'} = O_{2'} \cdot O_1 \\
 O_{22'} = O_{12'} \cdot O_1 - O_{2'} \\
 O_{32'} = O_{22'} \cdot O_1 - 2O_{12'}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 O_{3'} = O_{2'} \cdot O_{1'} - O_{1'} - O_{5'} \\
 O_{13'} = O_{3'} \cdot O_1 \\
 O_{23'} = O_{13'} \cdot O_1 - O_{3'} \\
 O_{33'} = O_{23'} \cdot O_1 - 2O_{13'}
 \end{array}$$

**Le graphe de Coxeter généralisé, modules et dimensions.** Le graphe non-simplement lacé  $F_4$  apparaît explicitement comme sous graphe du graphe de symétries quantiques que nous venons de présenter. Nous avons en effet deux graphes de type  $F_4$  qui apparaissent formulés comme sous-graphes du graphe d'Ocneanu, ils sont des modules sous l'action du graphe principal  $A_{11}$  et ils sont des modules sous l'action de  $E_6$  comme nous pouvons le voir dans la table de multiplication.

L'action de  $A_{11}$  sur  $F_4$  est donnée par les matrices  $F_i$ , définies par les relations de récurrence du graphe  $A_{11}$  avec générateur  $F_1 = Ad(F_4)$  et unité  $F_0 = \mathbb{I}_4$ . Nous obtenons ainsi l'ensemble de 11 matrices suivantes

$$\begin{aligned} F_0 &= \begin{pmatrix} 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{pmatrix} & F_1 &= \begin{pmatrix} \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & 2 & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot \end{pmatrix} & F_2 &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & 2 & \cdot \\ \cdot & 2 & \cdot & 2 \\ 1 & \cdot & 2 & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \\ F_3 &= \begin{pmatrix} \cdot & 1 & \cdot & 2 \\ 1 & \cdot & 4 & \cdot \\ \cdot & 2 & \cdot & 1 \\ 1 & \cdot & 1 & \cdot \end{pmatrix} & F_4 &= \begin{pmatrix} 1 & \cdot & 2 & \cdot \\ \cdot & 3 & \cdot & 2 \\ 1 & \cdot & 3 & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 \end{pmatrix} & F_5 &= \begin{pmatrix} \cdot & 2 & \cdot & \cdot \\ 2 & \cdot & 4 & \cdot \\ \cdot & 2 & \cdot & 2 \\ \cdot & \cdot & 2 & \cdot \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (3.10)$$

plus les identifications  $F_i = F_{10-i}$  pour  $i = 6, \dots, 10$ .

$F_4$  est aussi un module sur le graphe  $Oc(F_4)$ , l'action sur  $F_4$  est codée par les matrices  $S_x$ . Ce sont des matrices de dimension  $4 \times 4$  formant une représentation de dimension 4 de l'algèbre de symétries quantiques. Les matrices  $S_x$  peuvent être calculées par deux méthodes différentes : une première méthode considère le fait que les matrices  $S_x$  forment une représentation de l'algèbre de symétries quantiques, elles peuvent alors être calculées en utilisant les relations de récurrence des matrices  $O_x$ , avec les générateurs chiraux  $S_{\underline{1}} = S_{\underline{1}'} = Ad(F_4)$ .

La deuxième méthode considère la réalisation de  $Oc(F_4)$  comme produit de algèbres  $E_6$ , plus le fait que le sous graphe  $f$  est un module sur la sous-algèbre  $E_6$ . L'action de  $E$  sur le sous graphe  $f$  est codée par les six matrices :

$$s_0^f = \begin{pmatrix} 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{pmatrix} \quad s_1^f = \begin{pmatrix} \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & 2 & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot \end{pmatrix} \quad s_2^f = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & 2 & \cdot \\ \cdot & 2 & \cdot & 2 \\ 1 & \cdot & 2 & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \quad s_3^f = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & 2 \\ \cdot & \cdot & 2 & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$$

avec les identifications  $s_4^f = s_1^f$ ,  $s_5^f = s_0^f$ . L'action d'un élément  $x = a \otimes_J b$  sur un élément du graphe  $f$  est codé par les matrices  $S_x = s_a s_b$  où  $x = a \otimes_J b$ . La liste de matrices donnant l'action de  $Oc(F_4)$  sur  $F_4$  se présente comme suit :

$$\begin{aligned} S_{\underline{0}} &= \begin{pmatrix} 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{pmatrix} & S_{\underline{1}} &= \begin{pmatrix} \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & 2 & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot \end{pmatrix} & S_{\underline{2}} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & 2 & \cdot \\ \cdot & 2 & \cdot & 2 \\ 1 & \cdot & 2 & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \\ S_{\underline{3}} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & 2 \\ \cdot & \cdot & 2 & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} & S_{\underline{11}'} &= \begin{pmatrix} 1 & \cdot & 2 & \cdot \\ \cdot & 3 & \cdot & 2 \\ 1 & \cdot & 3 & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 \end{pmatrix} & S_{\underline{21}'} &= \begin{pmatrix} \cdot & 2 & \cdot & 2 \\ 2 & \cdot & 6 & \cdot \\ \cdot & 3 & \cdot & 2 \\ 1 & \cdot & 2 & \cdot \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.11)$$

plus les identifications :

$$\begin{aligned} S_{\underline{4}} &= \frac{1}{2} S_{\underline{33}'} = S_{\underline{0}} & ; & \quad S_{\underline{5}} = S_{\underline{1}'} = S_{\underline{5}'} = \frac{1}{2} S_{\underline{32}'} = \frac{1}{2} S_{\underline{23}'} = S_{\underline{1}} \\ S_{\underline{31}'} &= S_{\underline{2}'} = S_{\underline{13}'} = S_{\underline{2}} & ; & \quad S_{\underline{3}'} = S_{\underline{3}} \\ S_{\underline{15}'} &= \frac{1}{2} S_{\underline{22}'} = S_{\underline{11}'} & ; & \quad S_{\underline{12}'} = S_{\underline{21}'} \end{aligned} \quad (3.12)$$

**Règle de somme quadratique.** La liste de dimensions des blocs simples des algèbres  $A_{11}$  et  $Oc(F_4)$  est :

$$d_i = \{4, 7, 10, 13, 14, 14, 14, 13, 10, 7, 4\},$$

$$d_x = \{4, 7, 10, 6, 7, 4, 7, 14, 20, 10, 14, 7, 10, 20, 28, 14, 6, 10, 14, 8\}.$$

La somme des dimensions des blocs de type  $A_{11}$  donne comme résultat  $\sum_{i \in A_{11}} d_i^2 = 1256$ . Cette somme vaut la moitié des dimension du même type pour le graphe  $E_6$ , ce qui est attendu puisque  $F_2$  est un pliage  $\mathbb{Z}_2$  du graphe  $E_6$ . La relation entre la somme des dimensions carrées s'écrit donc :

$$\sum_{x \in Oc(F_4)} \frac{1}{n_x} d_x^2 = 2 \times \sum_{i \in A_{11}} d_i^2 = 2512$$

où le facteur est  $n_x = 2$  pour  $x = \{22', 32', 23', 33'\}$ , et  $n_x = 1$  pour tous les autres points de  $Oc(F_4)$ . Le facteur global 2 est dû au fait que  $F_4$  est un  $\mathbb{Z}_2$  pliage du graphe  $E_6$ , en correspondance avec l'étude générale des cas  $SU(2)$  présentée dans l'introduction.

Plus de détails sur les méthodes de calculs, et les différentes structures de cette solution des symétries quantiques peuvent être regardées dans l'article original de la solution du cas  $F_4$  [25].

**S2. Deuxième solution** : Nous admettons la relation  $W_{z,0} = W_{0,z}$  avec multiplicités. Considérons maintenant une solution à l'équation de *scission modulaire* pour laquelle les matrices toriques satisfont la relation (2.14), mais ces matrices apparaissent avec multiplicité deux pour certains vertex. La conjugaison dans  $SU(2)$  est triviale dû au fait que la relation (2.14) est simplement  $W_{z,0} = W_{0,z}$  pour  $z \in Oc(F_4)$ . Les matrices toriques différentes sont les mêmes que nous avons déjà calculée, elles définissent un ensemble de 20 matrices toriques auxquelles nous rajoutons aussi les identifications déterminées par la valeur de la multiplicité  $n_4$ , ainsi :

$$W_{14\epsilon,0} = W_{14,0} = \hat{W}_{14,0} \quad W_{15\epsilon,0} = W_{15,0} = \hat{W}_{15,0},$$

$$W_{18\epsilon,0} = W_{18,0} = \hat{W}_{18,0} \quad W_{19\epsilon,0} = W_{19,0} = \hat{W}_{19,0}.$$

La dimension de l'algèbre de symétries quantiques est  $d_O = 24$ , les générateurs chiraux  $V_{10}$  et  $V_{01}$  (en choisissant un ordre approprié pour les vertex  $z$ ) ont la forme explicite, écrite ci-dessous :



$$13\epsilon = 0 \dot{\otimes} 2\epsilon = \underline{2}'\epsilon \quad , \quad 14\epsilon = 1 \dot{\otimes} 2\epsilon = \underline{12}'\epsilon$$

$$18\epsilon = 0 \dot{\otimes} 3\epsilon = \underline{3}'\epsilon \quad , \quad 19\epsilon = 1 \dot{\otimes} 3\epsilon = \underline{13}'\epsilon$$

La partie chirale gauche est le graphe de Cayley de la multiplication des éléments de  $Oc(F_4)$  par le générateur  $\underline{1}$  (correspondant à la matrice  $V_{10}$ ). Les quatre sous graphes sont donnés par les ensembles des vertex :  $E = \{\underline{0}, \underline{1}, \underline{2}, \underline{3}, \underline{5}, \underline{4}\}$ ,  $e^1 = \{\underline{1}', \underline{11}', \underline{21}', \underline{31}', \underline{51}', \underline{41}'\}$ ,  $e^2 = \{\underline{32}', \underline{22}', \underline{12}', \underline{2}', \underline{22}\epsilon', \underline{32}\epsilon'\}$ ,  $e^3 = \{\underline{33}', \underline{23}', \underline{13}', \underline{3}', \underline{23}\epsilon', \underline{33}\epsilon'\}$ .

Les deux graphes modules  $e^2$  et  $e^3$  sont spéciaux pour deux raisons. D'abord les deux branches (identiques par  $\mathbb{Z}_2$ ) sont non-distinguables puisqu'elles sont étiquetées par les vertex dégénérés :  $\underline{22}'$ ,  $\underline{22}'\epsilon$ ,  $\underline{32}'$ ,  $\underline{32}'\epsilon$ ,  $\underline{23}'$ ,  $\underline{23}'\epsilon$  et  $\underline{33}'$ ,  $\underline{33}'\epsilon$  (voir Fig.3.4). Cette caractéristique implique la nécessité de fixer un troisième générateur ( $\underline{22}$  par exemple) pour pouvoir séparer les deux branches, et résoudre les relations de récurrence de l'algèbre de symétries quantiques. La deuxième observation importante est que les deux graphes modules  $e^2$  et  $e^3$  sont inversés par rapport aux graphes  $E$  et  $e^1$ , cette inversion est implémenté par la transformaation  $P$  que l'on défini dans les equations 3.13 et la Figure 3.5.

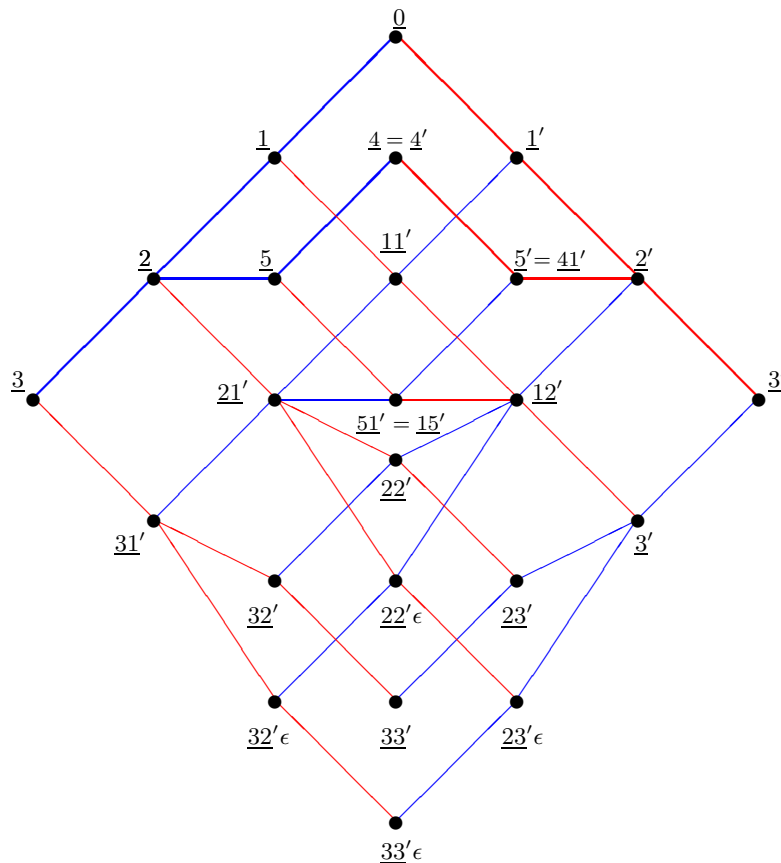


FIG. 3.4 – Graphe d'Ocneanu de  $F_4$  (solution simplement lacé)

La partie chirale droite (en rouge) est le graphe de Cayley de la multiplication par le

générateur  $\underline{1}'$  (correspondant à la matrice  $V_{01}$ ). Le graphe est symétrique par rapport à l'axe vertical défini par les huit vertex ambichiraux :  $\{\underline{0}, \underline{4}, \underline{11}', \underline{51}', \underline{22}', \underline{22}\epsilon', \underline{33}', \underline{33}\epsilon'\}$ . Dû à cette symétrie, les propriétés du côté chiral droit sont équivalentes à celles que nous venons de décrire pour le côté gauche.

Les générateurs  $V_{10}$  et  $V_{01}$ , et les équations (2.17), (2.18), (2.19) permettant de calculer automatiquement l'ensemble de matrices de double fusion  $V_{ij}$ . Les matrices toriques itwistées  $W_{xy}$  sont données par la relation  $(V_{ij})_{xy} = (W_{xy})_{ij}$ .

La table de multiplication de l'algèbre de symétries quantiques a la structure suivante :

$\times$	$E$	$e_1$	$e_2$	$e_3$
$E$	$E$	$e_1$	$e_2$	$e_3$
$e_1$	$e_1$	$E + P(e_2)$	$e_3 + P(e_1)$	$A(e_2)$
$e_2$	$e_2$	$e_3 + P(e_1)$	$E + P(e_2)$	$A(e_1)$
$e_3$	$e_3$	$A(e_2)$	$A(e_1)$	$E$

où chaque bloc  $E$  ou  $e_i$  est une table de multiplication  $6 \times 6$  de type  $E_6$  (voir table (3.3)) sur les vertex du graphe module correspondant. L'application  $A$  est l'automorphisme  $\mathbb{Z}_2$  du graphe  $E_6$  dans le sous-graphe correspondant, qui agit comme nous le signalons dans la Figure 3.1 et dans les équations 3.2.1.

L'application  $P$  est la transformation qui renverse le graphe  $E_6$  autour d'un axe horizontal comme nous l'illustrons Figure 3.5. Cette transformation a comme conséquence l'inversion des sous-graphes  $e_2$  et  $e_3$  par rapport aux sous graphes  $E$  et  $e_1$  que nous avons déjà remarqué.

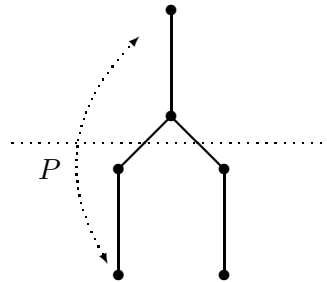


FIG. 3.5 – Action de la transformation  $P$  sur le graphe  $E_6$ .



$Oc(F_4)$  sont définies dans les expressions suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} O_0 = \mathbb{I}_{11} \\ O_1 = V_{10} \\ O_2 = O_1^2 - O_0 \\ O_4 = O_1^4 - 4O_1^2 + 2O_0 \\ O_5 = O_1 \cdot O_4 \\ O_3 = O_2 \cdot O_1 - O_5 - O_1 \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} O_{1'} = V_{01} \\ O_{11'} = O_1 \cdot O_1 \\ O_{21'} = O_2 \cdot O_{1'} \\ O_{31'} = O_3 \cdot O_{1'} \\ O_{15'} = O_5 \cdot O_{1'} \\ O_{5'} = O_5 \cdot O_{1'} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} O_{2'} = O_{1'}^2 - O_0 \\ O_{12'} = O_{2'} \cdot O_1 \\ O_{22\epsilon'} = O_{12'} \cdot O_1 - O_{2'} - \mathbf{O}_{22'} \\ O_{32'} = \mathbf{O}_{22'} \cdot O_1 - O_{12'} \\ O_{32\epsilon'} = O_{22\epsilon'} \cdot O_1 - O_{12'} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} O_{3'} = O_{2'} \cdot O_{1'} - O_{1'} - O_{5'} \\ O_{13'} = O_{12'} \cdot O_{1'} - O_{11'} \\ O_{23'} = \mathbf{O}_{22'} \cdot O_1 - O_{21'} \\ O_{23\epsilon'} = O_{22\epsilon'} \cdot O_1 - O_{21'} \\ O_{33'} = O_{32'} \cdot O_{1'} - O_{31'} \\ O_{33\epsilon'} = O_{32\epsilon'} \cdot O_{1'} - O_{31'} \end{array} \right.$$

où nous avons marqué en noir les équations où participe le générateur  $O_{22'}$ .

**Le graphe de Coxeter généralisé, modules et dimensions.** Dans cette réalisation des symétries quantiques associées à la fonction de partition  $Z_{F_4}$  le graphe non-simplement lacé  $F_4$  n'apparaît pas explicitement comme sous graphe du graphe des symétries quantiques. Le graphe de Dynkin est associé à la famille de graphes de norme  $2\cos(\frac{\pi}{12})$  parce qu'il est un module sur les graphes  $A_{11}$ ,  $E_6$  et le graphe de symétries quantiques  $Oc(F_4)$  de la Figure 3.4.

L'action de  $A_{11}$  sur  $F_4$  est implémentée par les matrices  $F_i$ . Ce sont des matrices de dimension 3 définies par les relations de récurrence du graphe  $A_{11}$  avec générateur  $F_1 = Ad(F_4)$  et unité  $F_0 = \mathbb{I}_4$ . On obtient l'ensemble de 11 matrices présentés dans l'équation 3.10.

L'action de  $Oc(F_4)$  sur  $F_4$  est codée par les matrices  $S_x$ , ce sont des matrices de dimension  $4 \times 4$  formant une représentation de dimension 4 de l'algèbre de symétries quantiques. Elles peuvent être calculés en utilisant les relation de récurrence des matrices  $O_x$ , avec les générateur chiraux donnés les matrices  $S_{\underline{1}} = S_{\underline{1}'} = Ad(F_4)$  plus le générateur extra pour départager les branches non-discernables des graphes  $e_2$  et  $e_3$  qui est donné par la matrice

$$S_{\underline{22}'} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

La matrice  $S_{14}$  est calculée en se servant de la relation (qu'on peut trouver à partir du graphe)

$$\underline{1}'^2 \underline{22}'^2 - \underline{1}'^2 \underline{1} - \underline{1}'^2 - \underline{22}' = 0.$$

La liste de matrices donnant l'action de  $Oc(F_4)$  sur  $F_4$  est la même que celle qui a été montré pour la réalisation non-simplement lacé de l'algèbre de symétries quantiques equation 3.11. Dans le cas présent la multiplicité prends en compte les facteurs  $\frac{1}{2}$ , et les identifications deviennent :

$$\mathbf{S}_{33\epsilon'} = S_{33'} = S_{\underline{4}} = S_{\underline{0}} \quad ; \quad \mathbf{S}_{23\epsilon'} = S_{23'} = \mathbf{S}_{32\epsilon'} = S_{32'} = S_{\underline{5}'} = S_{\underline{5}} = S_{\underline{1}'} = S_{\underline{1}};$$

$$S_{31'} = S_{\underline{2}'} = S_{13'} = S_{\underline{2}} \quad ; \quad S_{3'} = S_{\underline{3}};$$

$$S_{15'} = S_{\underline{22}'} = \mathbf{S}_{22\epsilon'} = S_{\underline{11}'} \quad ; \quad S_{12'} = S_{\underline{21}'};$$

où les matrices qui apparaissent à cause de la multiplicité sont marquées en noir.

**Règle de somme quadratique.** La liste de dimensions des blocs simples des algèbres  $A_{11}$  et  $Oc(F_4)$  sont les suivantes

$$d_i = \{4, 7, 10, 13, 14, 14, 14, 13, 10, 7, 4\},$$

$$d_x = \{4, 7, 10, 7, 4, 6, 7, 14, 20, 14, 7, 10, 7, 14, 20, 14, 7, 10, 4, 7, 10, 7, 4, 6\}.$$

La somme des dimensions des blocs de type  $A_{11}$  donne comme résultat  $\sum_{i \in A_{11}} d_i^2 = 1256$ . On observe que cette valeur est la moitié de la dimension du même type pour le graphe  $E_6$ , ce qui est attendu, puisque  $F_2$  est un pliage  $\mathbb{Z}_2$  du graphe  $E_6$ . La relation entre la somme des dimensions carrés n'a plus les facteurs  $\frac{1}{2}$  qui apparaissaient, pour la première solution analysée dans les termes correspondant des vertex dégénérés

$$\sum_{x \in Oc(F_4)} d_x^2 = 2 \times \sum_{i \in A_{11}} d_i^2 = 2512.$$

On note que la valeur de la somme est la même que dans la réalisation non simplement lacée, le facteur global 2 est toujours du au fait que  $F_4$  est un  $\mathbb{Z}_2$  pliage du graphe  $E_6$ .

### 3.2.2 Le cas $B_3$ .

Le cas  $B_3$  est le plus petit des graphes non-simplement lacés du système  $SU(2)$ . La norme du graphe est  $\beta = 2\cos(\frac{\pi}{\kappa})$  avec  $\kappa = 6$ ,  $B_3$  est associé aux graphes  $A_5$  et  $D_4$ . Les exposants du graphe sont  $\{1, 3, 5\}$ , ils sont un sous-ensemble des exposants du graphe  $A_5$  qui sont les suivantes :  $\{1, 2, 3, 4, 5\}$ . Le graphe  $B_3$  est obtenu par un pliage  $\mathbb{Z}_2$  de  $A_5$  comme illustré dans la Figure 3.1. L'action de  $\mathbb{Z}_2$  sur les vertex de  $A_5$  est

$$A(0) = 4 \quad ; \quad A(1) = 3 \quad ; \quad A(2) = 2.$$

Considérons la fonction de partition invariante modulaire associée au graphe  $A_5$ .

$$Z_{A_5} = |\chi_0|^2 + |\chi_1|^2 + |\chi_2|^2 + |\chi_3|^2 + |\chi_4|^2. \tag{3.14}$$

La restriction de cette fonction de partition aux caractères étiquetés par les exposants de  $B_3$  est

$$Z_{B_3} = |\chi_0|^2 + |\chi_2|^2 + |\chi_4|^2. \tag{3.15}$$

Cette nouvelle fonction de partition est le point de départ pour l'étude des symétries quantiques d'un nouveau cas non-ADE. La nouvelle fonction de partition  $Z_{F_4}$  peut s'écrire comme dans l'équation 3.1 en se servant de la matrice modulaire :

$$M_{B_3} = \begin{pmatrix} 1 & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & 1 & . & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & 1 \end{pmatrix}. \tag{3.16}$$

Les propriétés modulaires de la nouvelle fonction de partition peuvent être déterminées facilement en utilisant la représentation  $5 \times 5$  des générateurs du groupe modulaire  $S$  et  $T$

$$S = \begin{pmatrix} \frac{1}{2\sqrt{3}} & \frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2\sqrt{3}} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & -\frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2\sqrt{3}} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2\sqrt{3}} \end{pmatrix} \quad T = \begin{pmatrix} e^{-\frac{i\pi}{6}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\frac{i\pi}{12}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-\frac{i\pi}{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{\frac{i\pi}{6}} \end{pmatrix}. \quad (3.17)$$

A partir de ces expressions, on vérifie les relations de commutation

$$[S^{-1}T^{-2}S, M] = 0 \quad \text{et} \quad [T, M] = 0,$$

qui implique que  $Z_{B_3}$  est invariante sous l'action du sous-groupe de congruence  $\Gamma_0(2)$ .

**Scission Modulaire.** Le membre gauche de l'équation (3.1.2) donne une famille de 25 matrices  $K_{ij}$  de dimension  $5 \times 5$ , l'espace vectoriel engendré par ces matrices a dimension  $r = 9$ . La décomposition des matrices  $K_{jk}$  sur une base de matrices toriques satisfaisant l'équation de scission modulaire est comme suit :

- **Norme 1** : Les matrices  $K_{0,0}, K_{0,1}, K_{0,1}, K_{0,3}, K_{0,4}, K_{1,0}, K_{1,4}$  sont de norme carré 1, elles définissent les 7 matrices toriques :  $W_{0,0} = K_{0,0}, W_{1,0} = K_{0,1}, W_{2,0} = K_{0,1}, W_{3,0} = K_{0,3}, W_{4,0} = K_{0,4}, W_{8,0} = K_{1,0}, W_{6,0} = K_{1,4}$
- **Norme 2** : Il y a quatre matrices de norme carré égal à deux :  $K_{1,1}, K_{1,2}, K_{1,3}$  et  $K_{2,2}$ , elles se décomposent chacune en une somme de deux matrices toriques. Les matrices  $K_{1,2}$  et  $K_{2,2}$  ne sont pas l.i. et se décomposent comme la somme de deux matrices déjà connues

$$K_{1,2} = W_{6,0} + W_{8,0} \quad K_{2,2} = W_{1,0} + W_{3,0}. \quad (3.18)$$

Les deux matrices  $K_{1,1}$  et  $K_{1,3}$  se décomposent chacune en somme de deux nouvelles matrices dont une est déjà connue, cela définit alors 3 nouvelles matrices toriques,  $W_{5,0}, W_{7,0}$  et  $W_{9,0}$ .

$$K_{1,1} = W_{7,0} + W_{9,0} \quad ; \quad K_{1,3} = W_{7,0} + W_{5,0}. \quad (3.19)$$

La forme explicite de ces trois nouvelles matrices est donnée dans la liste de matrices toriques présenté plus bas.

- **Norme 3** : Il y a une matrice de norme carré égale à trois  $K_{2,3}$ , cette matrice est la somme de trois matrices toriques déjà connues

$$K_{2,3} = W_{0,0} + W_{2,0} + W_{4,0} \quad (3.20)$$

La décomposition 3.19 paraît peut naturelle parce qu'on a déterminé auparavant que la dimension de l'espace généré par les matrices  $K_{jk}$  est 9. La relation de dépendance entre les matrices est  $W_{7,0} = W_{5,0} + W_{9,0}$ . Du point de vue de la base de l'espace des  $K_{uk}$  la

matrice  $W_{7,0}$  est superflue, mais la définition des matrices toriques dépend aussi de l'équation de scission modulaire qui fixe, à travers de la norme, le nombre de matrices qui interviennent dans la décomposition de chaque matrice  $K_{jk}$ . La décomposition 3.19 est la décomposition minimale qui répond à la condition de norme carrés égale à deux.

On a ainsi trouvé l'ensemble des matrices toriques  $W_{x,0}$ , les matrices  $W_{0,x}$  sont définies par  $W_{0,x} = W_{x,0}$ . Avec ces deux ensembles de matrices l'équation de *scission modulaire* est vérifiée. La forme explicite de ces matrices est la suivante

$$\begin{aligned}
 W_{0,0} &= M \\
 W_{1,0} = W_{8,0}^{tr} &= \begin{pmatrix} \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \end{pmatrix} & W_{2,0} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & 1 & \cdot & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \\
 W_{3,0} = W_{6,0}^{tr} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} & W_{4,0} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \\
 W_{7,0} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} & W_{5,0} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \\
 W_{9,0} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

**Le graphe d'Ocneanu et l'algèbre des symétries quantiques.**

La dimension de l'algèbre de symétries quantiques est  $d_O = 10$ , la solution de l'équation (2.10) pour les paires d'indices  $(i, j)$  égales à  $(0, 1)$  et  $(1, 0)$  donne les deux générateurs chiraux  $V_{10}$  et  $V_{01}$  respectivement. Dans l'ordre que l'on a choisi pour les matrices toriques ces générateurs ont la forme suivante :

$$V_{10} = \left( \begin{array}{c|c} Ad(A_5) & \cdot \\ \cdot & Ad(A_5) \end{array} \right) \quad V_{01} = \left( \begin{array}{c|c} \cdot & Ad(A_5) \\ Ad(A_5) & \cdot \end{array} \right) \tag{3.21}$$

$$Ad(A_5) = \begin{pmatrix} \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \end{pmatrix}$$

où  $Ad(A_5)$  est la matrice d'adjacence du graphe  $A_5$ . Ces deux matrices sont les matrices d'adjacence des parties chirales gauches et droites du graphe d'Ocneanu qui est présenté Figure 3.6.

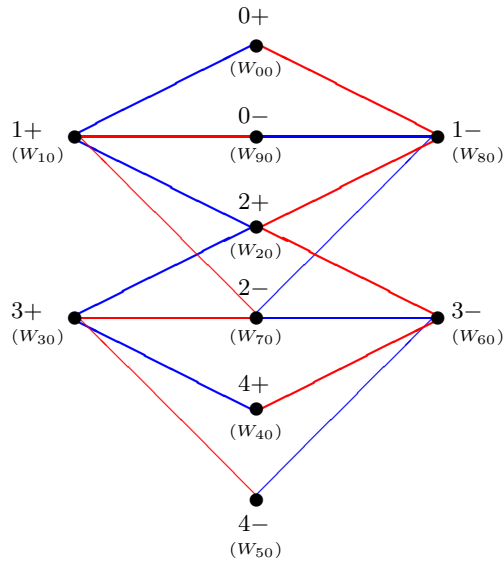


FIG. 3.6 – Graphe d'Ocneanu de  $B_3$

Chaque graphe chirale est composé par l'union de deux sous-graphes disjoints de type  $A_5$ , chaque graphe chirale est obtenu à partir de l'autre en effectuant une symétrie autour de l'axe vertical formé par les vertex ambi-chiraux. Les vertex du graphe de Ocneanu sont les éléments de la base de l'algèbre de symétries quantiques, cette algèbre est générée par deux générateurs dénotés par  $1+$  et  $1-$ . La partie chirale gauche (en bleu) est le graphe de Cayley de la multiplication des éléments de  $Oc(F_4)$  par le générateur  $1+$  (correspondant à la matrice  $V_{10}$ ). La partie chirale droite (en rouge) est le graphe de Cayley de la multiplication par le générateur  $1-$  (correspondant à la matrice  $V_{01}$ ). Pour chaque graphe chirale le premier sous graphe (de type  $A_5$ ) est une sous-algèbre de graphe appelé la **sous algèbre chirale**. La sous algèbre chirale gauche est engendrée par les vertex  $\{0+, 1+, 2+, 3+, 4+\}$  et est générée par  $1+$ . La sous algèbre chirale droite est engendrée par les vertex  $\{0+, 1-, 2+, 3-, 4+\}$  et est générée par  $1-$ . Le deuxième sous graphe de type  $A_5$  est engendré par les vertex  $\{0-, 1-, 2-, 3-, 4-\}$ , il constitue un module sur la sous algèbre chirale gauche.

Grâce à la symétrie présente entre la partie chirale gauche et droite, nous savons que la structure est identique pour le graphe chirale droite.

L'algèbre de symétries quantiques est réalisée comme  $Oc(B_3) = A_5 \times \mathbb{Z}_2$ , les labels de la

Figure 3.6 correspondent à la notation des éléments de la base  $i\pm$  où  $i$  dénote les vertex du graphe  $A_5$ . L'identification entre les notations est la suivante  $x \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\} \rightarrow \{0+, 1+, 2+, 3+, 4+, 4-, 3-, 2-, 1-, 0-\}$ . Le produit dans  $Oc(B_3)$  est défini comme

$$\begin{aligned} (i, +) \circ (j, +) &= (ij, +) & (i, +) \circ (j, -) &= (ij, -) \\ (i, -) \circ (j, +) &= (i(j), -) & (i, -) \circ (j, -) &= (i(j), +) \end{aligned} \tag{3.22}$$

Une représentation  $10 \times 10$  de l'algèbre de symétries quantiques est donnée en par les matrices  $O_x$  qui sont calculées à partir des deux générateurs  $O_1 = V_{10}$  et  $O_8 = V_{01}$ , l'unité  $O_{(0,+)}$ , et le générateur extra  $O_{(0,-)} = \left( \begin{array}{c|c} \cdot & \mathbb{I}_5 \\ \hline \mathbb{I}_5 & \cdot \end{array} \right)$ .

Cette dernière est calculée en se servant de la relation  $W_{(1,-),x} = \sum_{y \in Oc(B_3)} (O_{1,-})_{xy} W_{y,(0,+)}$ , la multiplication par les générateurs est codée par le graphe et permet de calculer les matrices  $O_x$  comment suis :

$$\begin{aligned} O_{(2,\pm)} &= O_{(1,\pm)} O_{(1,\pm)} - O_{(0,\pm)} \\ O_{(3,\pm)} &= O_{(1,\pm)} O_{(1,\pm)} O_{(1,\pm)} - 2O_{(1,\pm)} \\ O_{(4,\pm)} &= O_{(1,\pm)} O_{(1,\pm)} O_{(1,\pm)} O_{(1,\pm)} - O_{(1,\pm)} + O_{(0,\pm)} \end{aligned} \tag{3.23}$$

Les matrices  $O_x$  peuvent être exprimées de manière compacte à partir des matrices de fusion de  $A_5$ .

$$O_{(i,+)} = \left( \begin{array}{c|c} N_i & \cdot \\ \hline \cdot & N_i \end{array} \right) \quad O_{(i,-)} = \left( \begin{array}{c|c} \cdot & N_i \\ \hline N_i & \cdot \end{array} \right) \tag{3.24}$$

ces matrices fournissent les constantes de structure de l'algèbre de symétries quantiques, et satisfont la relation 1.44.

Chaque partie chirale est composée par l'union de deux graphes disjoints de type  $A_5$  :  $\{0+, 1+, 2+, 3+, 4+\} \cup \{0-, 1+, 2-, 3+, 4-\}$  pour le sous graphe chirale gauche et  $\{0+, 1-, 2+, 3-, 4+\} \cup \{0-, 1-, 2-, 3-, 4-\}$ . Les sous-graphes  $\{0+, 1+, 2+, 3+, 4+\}$  et  $\{0+, 1-, 2+, 3-, 4+\}$  sont sous-algèbres de graphe de type  $A_5$  notées. Les sous-graphes  $\{0-, 1-, 2-, 3-, 4-\}$  et  $\{0-, 1-, 2-, 3-, 4-\}$  sont un sous-graphe module sur le respective (gauche ou droit) algèbre de graphe  $A_5$ . La table de multiplication peut être construite à partir de la table de multiplication de  $A_5$ , et la réalisation de l'algèbre  $Oc(B_3)$ .

$\times$	$A_5$	$a_5$
$A_5$	$A_5$	$a_5$
$a_5$	$a_5$	$A_5$

### Le graphe de Coxeter généralisé, modules et dimensions.

Contrairement au cas précédent, le graphe  $B_3$  n'apparaît pas explicitement parmi les sous-graphes qui composent le graphe de symétries quantiques, mais on sait que le graphe non simplement lacé  $B_3$  est le troisième de la série de cinq graphes de nombre de Coxeter six dans la série  $SU(2)$ . Les quatre autres graphes sont le graphe  $A_5$  lui-même, le graphe orbifold  $D_4$  et les graphes non simplement lacés  $G_2$ . Le graphe  $B_3$  et sa matrice d'adjacence sont montrés Figure 3.7



FIG. 3.7 – Le graphe de Coxeter  $B_3$  et sa matrice d'adjacence  $Ad(B_3)$

$B_3$  est un module à droite et à gauche sur  $A_5$ , l'action de  $A_5$  sur  $B_3$  est codée par les constantes de structure  $(F_i)_{ab}$  où  $a$  et  $b$  sont des vertex de  $B_3$ . Les matrices  $F_i$  sont des matrices de dimension  $3 \times 3$  obtenues à partir des relations de récurrence codées par le graphe  $A_5$ , avec générateur  $F_1 = Ad(B_3)$  et unité  $F_0 = \mathbb{I}_3$ .

$$F_0 = F_4 = \mathbb{I}_3; \quad F_1 = F_3 = Ad(B_3); \quad F_2 F_1^2 - F_0 = \begin{pmatrix} . & . & 1 \\ . & 2 & . \\ 2 & . & 1 \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

$B_3$  est un module sur le graphe  $Oc(B_3)$ , l'action de  $Oc(B_3)$  sur  $B_3$  est codée par les constantes de structure  $(S_x)_{ab}$ . Les matrices  $S_x$  sont des matrices de dimension  $3 \times 3$ , et sont calculées à partir des relations de récurrence codées par le graphe  $Oc(B_3)$  (deux copies des relations de récurrence du graphe  $A_5$ ) avec générateurs chiraux  $S_{1+} = S_{1-} = Ad(B_3)$  et unités  $S_{0+} = S_{0-} = \mathbb{I}_3$ . Mais les matrices  $S_x$  peuvent être aussi obtenues à partir de la réalisation de l'algèbre des symétries quantiques. En effet l'action à gauche  $(i, \pm) a = \sum_{b \in B_3} (S_{i\pm})_{ba} b$  est obtenue de manière naturelle

$$(i, +) a = i a = \sum_{b \in B_3} (F_i)_{ba} b \Rightarrow S_{i+} = F_i \quad (3.26)$$

$$(i, -) a = i a = \sum_{b \in B_3} (F_i)_{ba} b \Rightarrow S_{i-} = F_i \quad (3.27)$$

**Règle de somme quadratique.** De manière similaire que pour le cas  $F_4$  nous appelons  $d_i$  et  $d_x$  les analogues des dimensions des blocs simples associés au graphe  $B_3$ . La liste des dimensions des blocs de type  $i$  et  $x$  est respectivement

$$d_i = \{3, 5, 6, 5, 3\}$$

$$d_x = \{3, 5, 6, 5, 3, 3, 5, 6, 5, 3\}$$

La somme des dimensions carrées donne comme résultat  $\sum_{x \in Oc(B_3)} d_x^2 = 2 \times \sum_{i \in A_5} d_i^2 = 208$

Contrairement au cas  $F_4$ , et en accord avec le fait qu'il n'y a pas de double liens dans le graphe d'Ocneanu, il n'est pas nécessaire d'introduire des valeurs  $\frac{1}{2}$  dans certains des dimensions des blocs de type  $x$ . On verra par la suite comment ces facteurs apparaissent dès que les graphes non simplement lacés apparaissent explicitement dans le graphe des symétries quantiques.

**Règle de somme linéaire.** Encore en analogie au cas  $ADE$  et au cas non simplement lacé  $F_4$ , on étudie la somme linéaire des dimensions  $d_i$  et  $d_x$ . On trouve que  $\sum_{x \in Oc(B_3)} d_x = 2 \times \sum_{i \in A_5} d_i = 44$ .

Résultat qui est à nouveau consistant avec ceux obtenus préalablement.

**Autres actions de modules associés.** Comme on l'a remarqué dans les paragraphes précédents, la famille des graphes de nombre de Coxeter 6 est particulièrement riche parce qu'elle comporte cinq graphes  $A_5$ ,  $D_4$ ,  $B_3$ ,  $C_3$  et  $G_2$  dont trois sont des graphes non simplement lacés. L'identification de la fonction de partition  $Z_{B_3}$  avec le graphe non simplement lacé  $B_3$  a été établie grâce aux relations de module avec le graphe principal  $A_5$  et le graphe de symétries quantiques  $Oc(B_3)$  qui a été construit à partir de  $Z_{B_3}$ . Mais il s'avère que ce cas est spécial aussi parce que les autres deux graphes liés  $D_4$  et  $G_2$  sont aussi des modules sur  $A_5$  et  $Oc(B_3)$ .

L'action de  $A_5$  sur ces deux graphes est donnée de manière naturelle par les matrices  $F_i$  qu'on sait bien définies puisque le nombre de Coxeter est le même. Les matrices  $F_i$  sont des matrices de dimension  $4 \times 4$  ou  $2 \times 2$  et l'on peut les calculer de la manière standard à partir des relations de récurrence du graphe  $A_5$ . Les générateurs sont alors  $F_1^{D_4} = Ad(D_4)$  et  $F_1^{G_2} = Ad(G_2)$ . La forme explicite de ces matrices est déjà bien connue [66],[26], et est pour le cas  $G_2$  présentée dans la prochaine section de ce chapitre. Les dimensions et la règle de somme quadratique sont les suivantes

$$d_i^{D_4} = \{4, 6, 8, 6, 4\} \Rightarrow \sum_{i \in A_5} (d_i^{D_4})^2 = 168$$

$$d_i^{G_2} = \{2, 4, 4, 4, 2\} \Rightarrow \sum_{i \in A_5} (d_i^{G_2})^2 = 56$$

L'action de  $Oc(B_3)$  sur  $D_4$  et  $G_2$  est codée par les matrices  $S_x^{D_4}$  et  $S_x^{G_2}$ . Ce sont des matrices de dimension  $4 \times 4$  et  $2 \times 2$  respectivement, et elles sont calculées à partir des

relations de récurrence codées par le graphe  $Oc(B_3)$  de la même manière que pour le cas  $B_3$  mais avec générateurs chiraux  $S_{1+}^{D_4} = S_{1-}^{D_4} = Ad(D_4)$  et  $S_{1+}^{G_2} = S_{1-}^{G_2} = Ad(G_2)$  respectivement.

La forme explicite de ces matrices pour le cas  $D_4$  est

$$S_{0+}^{D_4} = S_{4+}^{D_4} = S_{4-}^{D_4} = S_{0-}^{D_4} = \mathbb{I}_4; \quad S_{1+}^{D_4} = S_{3+}^{D_4} = S_{3-}^{D_4} = S_{1-}^{D_4} = Ad(D_4);$$

$$S_{2+}^{D_4} = S_{2-}^{D_4} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & 1 & 1 \\ \cdot & 2 & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & \cdot & 1 \\ 1 & \cdot & 1 & \cdot \end{pmatrix} \quad (3.28)$$

La forme explicite de ces matrices pour le cas  $G_2$  est

$$S_{0+}^{G_2} = S_{4+}^{G_2} = S_{4-}^{G_2} = S_{0-}^{G_2} = \mathbb{I}_4; \quad S_{1+}^{G_2} = S_{3+}^{G_2} = S_{3-}^{G_2} = S_{1-}^{G_2} = Ad(G_2);$$

$$S_{2+}^{G_2} = S_{2-}^{G_2} = \begin{pmatrix} 2 & \cdot \\ \cdot & 2 \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

Les dimensions et la règle de somme quadratique sont les suivantes

$$d_x^{D_4} = \{4, 6, 8, 6, 4, 4, 6, 8, 6, 4\} \Rightarrow \sum_{i \in A_5} (d_i^{D_4})^2 = 336$$

$$d_i^{G_2} = \{2, 4, 4, 4, 2, 2, 4, 4, 4, 2\} \Rightarrow \sum_{i \in A_5} (d_i)^2 = 112$$

On voit dans chacun de ces cas la relation  $\sum_x (d_x)^2 = 2 \times \sum_i (d_i)^2$ , on pourrait alors être amené à considérer les symétries quantiques associées à la fonction de partition  $Z_{B_3}$  comme celles liées à n'importe quel graphe de la famille de graphes de  $SU(2)$  avec  $\kappa = 6$ , particulièrement si on considère les résultats obtenus dans la section suivante, où on trouve que le graphe  $B_3$  apparaît explicitement dans le graphe d'Ocneanu associé au graphe  $G_2$ .

### 3.2.3 Le cas $B_4$

On considère la fonction de partition invariante modulaire associée au graphe principal  $A_7$ .

$$Z_{A_7} = |\chi_0|^2 + |\chi_1|^2 + |\chi_2|^2 + |\chi_3|^2 + |\chi_4|^2 + |\chi_5|^2 + |\chi_6|^2 \quad (3.30)$$

Le nombre de Coxeter de  $A_7$  est  $\kappa = 8$  et son niveau est  $l = 6$ . La représentation  $7 \times 7$  des générateurs du groupe modulaire  $S$  et  $T$  a la forme suivante :

$$S = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \xi & \frac{1}{\sqrt{2}} & \varphi & 1 & \varphi & \frac{1}{\sqrt{2}} & \xi \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \cdot & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \varphi & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\xi & -1 & -\xi & \frac{1}{\sqrt{2}} & \varphi \\ 1 & \cdot & -1 & \cdot & 1 & \cdot & -1 \\ \varphi & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\xi & 1 & -\xi & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \varphi \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -1 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \cdot & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & \frac{-1}{2\sqrt{2}} \\ \xi & -\frac{1}{2\sqrt{2}} & \varphi & -1 & \varphi & \frac{-1}{2\sqrt{2}} & \xi \end{pmatrix}$$

et  $T = \text{diag} \left( e^{-\frac{3i}{16}\pi}, 1, e^{\frac{5i}{16}\pi}, e^{\frac{3i}{4}\pi}, e^{-\frac{11i}{16}\pi}, 1, e^{\frac{13i}{16}\pi} \right)$  où  $\xi = \frac{1}{2}\sqrt{2-\sqrt{2}}$  et  $\varphi = \frac{1}{2}\sqrt{2+\sqrt{2}}$ . L'action du générateur  $S$  sur les combinaisons appropriées des entrées du vecteur de caractères de l'algèbre fusion  $\chi$  est comme suit

$$\begin{aligned} \chi_0 + \chi_2 + \chi_4 + \chi_6 &\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \sqrt{2-\sqrt{2}}(\chi_2 + \chi_4) + \sqrt{2+\sqrt{2}}(\chi_0 + \chi_6) \right) \\ \chi_1 + \chi_3 + \chi_5 &\rightarrow \frac{1}{2} \left( (1 + \sqrt{2})(\chi_0 - \chi_6) - (1 - \sqrt{2})(\chi_2 + \chi_4) \right) \end{aligned}$$

Les exposants modulaires du graphe  $A_7$  sont montrés Figure (3.1), avec l'identification  $\mathbb{Z}_2$  qui donne origine de manière empirique au  $B_4$ . Les exposant qui sont bien définis sur le graphe orbifold sont les correspondants aux vertex 0, 2 4 et 6. Cela permet de proposer une fonction de partition

$$Z_{B_3} = |\chi_0|^2 + |\chi_2|^2 + |\chi_4|^2 + |\chi_6|^2 \tag{3.31}$$

qu'on notera avec le sous-index  $B_4$  puisque les entrées diagonales de l'invariant modulaire

$$M_{B_3} = \begin{pmatrix} 1 & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & 1 & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & 1 & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & 1 \end{pmatrix} \tag{3.32}$$

correspondent aux exposants du graphe  $B_4$ . La fonction de partition  $Z_{B_4}$  est invariante sous l'action du même sous-groupe de congruence  $\Gamma_0(2)$  que pour le cas  $B_3$ .

**Scission Modulaire.** Le membre de gauche de l'équation (3.1.2) donne une famille de 49 matrices  $K_{i\mu}$  de dimension  $7 \times 7$ . L'espace vectoriel engendré par cet ensemble de matrices est de dimension  $r = 13$ . On s'attend à avoir une algèbre de symétries quantiques de dimension plus grande que 13 puisque  $B_4$  est un graphe non simplement lacé. Le calcul des matrices toriques à partir de la norme des matrices  $K_{i\mu}$  se fait comme suit

- **Norme 1 :** Les matrices  $K_{0,0}, K_{0,1}, K_{0,2}, K_{0,3}, K_{0,4}, K_{0,5}, K_{0,6}, K_{1,0}, K_{1,6}, K_{3,2}$  sont de norme 1 et donnent 10 matrices toriques  $W_{x,0}$  comme suit  $W_{0,0} = K_{0,0}, W_{1,0} = K_{0,1}, W_{2,0} = K_{0,2}, W_{3,0} = K_{0,3}, W_{4,0} = K_{0,4}, W_{5,0} = K_{0,5}, W_{6,0} = K_{0,6}, W_{12,0} = K_{1,0}, W_{8,0} = K_{1,6}, W_{10,0} = K_{3,2}$ .
- **Norme 2 :** Il y a sept matrices de norme deux  $K_{1,1}, K_{1,2}, K_{1,3}, K_{1,4}, K_{1,5}, K_{2,2}$  et  $K_{2,6}$ . Ce sont de matrices de norme 2 elles se décomposent donc chacune en une somme de deux matrices toriques.

Les matrices  $K_{1,2}, K_{1,4}, K_{2,2}$  et  $K_{2,6}$  ne sont pas l.i. et se décomposent comme la somme de deux matrices déjà connues

$$K_{1,2} = W_{10,0} + W_{12,0} \quad K_{1,4} = W_{10,0} + W_{8,0} \tag{3.33}$$

$$K_{2,2} = W_{1,0} + W_{3,0} \quad K_{2,6} = W_{5,0} + W_{3,0} \quad (3.34)$$

Les trois matrices  $K_{1,1}$ ,  $K_{1,3}$  et  $K_{1,5}$  se décomposent chacune en une combinaison linéaire de 4 nouvelles matrices toriques.

$$K_{1,1} = W_{13,0} + W_{11,0} \quad K_{1,3} = W_{11,0} + W_{9,0} \quad K_{1,5} = W_{7,0} + W_{9,0} \quad (3.35)$$

La forme explicite de ces trois nouvelles matrices est donnée dans la liste de matrices toriques présentée dans la table suivante.

- **Norme 3** : Il y a quatre matrices de norme carré égale à trois  $K_{2,3}$ ,  $K_{2,4}$ ,  $K_{2,5}$  et  $K_{3,4}$  elles sont la somme de trois matrices toriques déjà connues

$$K_{2,3} = W_{0,0} + W_{2,0} + W_{4,0} \quad K_{2,4} = W_{1,0} + W_{3,0} + W_{5,0} \quad (3.36)$$

$$K_{2,5} = W_{2,0} + W_{4,0} + W_{6,0} \quad K_{3,4} = W_{8,0} + W_{10,0} + W_{12,0} \quad (3.37)$$

- **Norme 4** : Il y a une matrice de norme carré égale à quatre,  $K_{3,5}$ , cette matrice est la somme de trois matrices toriques déjà connues

$$K_{3,5} = W_{7,0} + W_{9,0} + W_{11,0} + W_{13,0} \quad (3.38)$$

On a de cette façon définie 14 matrices toriques, les matrices  $W_{0,x}$  sont égales aux matrices  $W_{x,0}$ , et cet ensemble de matrices toriques satisfait l'équation de *scission modulaire*. La forme explicite de ces matrices est la suivante

$$W_{0,0} = M$$

$$W_{1,0} = W_{12,0}^{tr} = \begin{pmatrix} \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \quad W_{2,0} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$$

$$W_{3,0} = W_{10,0}^{tr} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \quad W_{4,0} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 W_{5,0} = W_{8,0}^{tr} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} & W_{6,0} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \\
 W_{7,0} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} & W_{9,0} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \\
 W_{11,0} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} & W_{13,0} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

**Le graphe d’Ocneanu et l’agèbre des symétries quantiques.**

Le graphe d’Ocneanu a dimension  $d_O = 14$ . A partir de la solution de l’équation (2.10) pour les paires d’indexés  $(i, \mu)$  égal à  $(0, 1)$  et  $(1, 0)$  on obtient les deux générateurs chiraux  $V_{10}$  et  $V_{01}$  respectivement qui, dans l’ordre qu’on a choisi pour les matrices toriques, ont la forme suivante

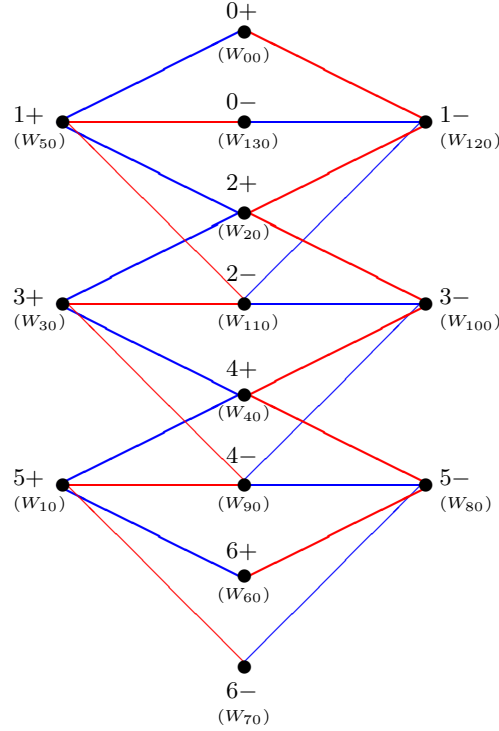
$$V_{10} = \left( \begin{array}{c|c} Ad(A_7) & \cdot \\ \cdot & Ad(A_7) \end{array} \right) \quad V_{01} = \left( \begin{array}{c|c} \cdot & Ad(A_7) \\ Ad(A_7) & \cdot \end{array} \right) \tag{3.39}$$

ou

$$Ad(A_7) = \begin{pmatrix} \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \end{pmatrix}$$

est la matrice d’adjacence du graphe  $A_7$ . Ces deux matrices sont les matrices d’adjacence des parties chirales gauches et droites du graphe d’Ocneanu qui est présentée Figure 3.8.

A partir des matrices  $V_{00} = \mathbb{I}$ ,  $V_{10}$  et  $V_{01}$ , les équations (2.17), (2.18) et (2.19) permettent de récupérer de manière automatique les matrices de double fusion  $V_{ij}$ , et ces dernières donnent les matrices toriques twistées  $W_{xy}$ .

FIG. 3.8 – Graphe d’Ocneanu de  $B_4$ 

L’algèbre des symétries quantiques est réalisée comme  $Oc(B_4) = A_7 \rtimes \mathbb{Z}_2$ , les étiquettes de la Figure 3.8 correspondent à la notation de la base  $(i, \pm)$  où  $i$  est un vertex du graphe  $A_7$ , l’identification entre la notation des matrices toriques et celle correspondante à la réalisations est naturellement

$$x \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13\} \rightarrow \{0+, 1+, 2+, 3+, 4+, 5+, 6+, 6-, 5-, 4-, 3-, 2-, 1-, 0-\}$$

Le produit dans  $Oc(B_4)$  est défini comme pour  $B_3$  par les équations (3.22), avec  $i$  qui parcourt maintenant les vertex de  $A_7$ . Une représentation  $7 \times 7$  de l’algèbre de symétries quantiques est donnée en termes des matrices  $O_x$  qui peuvent être calculés de façon similaire au cas  $B_3$  à partir des deux générateurs  $O_1 = V_{10}$  et  $O_{11} = V_{01}$ , de l’unité  $O_0 = \mathbb{I}_{14}$  et la multiplication par les générateurs codés par le graphe. Elles sont exprimées à partir de des matrices de fusion de  $A_7$ ,

$$O_{(i,+)} = \left( \begin{array}{c|c} N_i & \cdot \\ \cdot & N_i \end{array} \right) \quad O_{(i,-)} = \left( \begin{array}{c|c} \cdot & N_i \\ N_i & \cdot \end{array} \right) \quad (3.40)$$

Ces matrices fournissent les constantes de structure de l’algèbre des symétries quantiques, et satisfont la relation 1.44.

Chaque partie chirale est composée par l’union de deux graphes disjoints de type  $A_7$ . Le premier  $A_7^L = \{0+, 1+, 2+, 3+, 4+\}$  ou  $A_7^R = \{0+, 1-, 2+, 3-, 4+\}$  est une sous-algèbre de graphe de type  $A_7$ . Le deuxième  $a_7^L = \{0-, 1-, 2-, 3-, 4-\}$  ou  $a_7^R = \{0-, 1+, 2-, 3+, 4-\}$

est un sous-graphe module sur le graphe respectif  $A_7$ , où les super indices  $L$  et  $R$  dénotent la sous algèbre chirale gauche et droite respectivement. La table de multiplication est exprimée en termes de la table de multiplication de  $A_7$ .

×		$A_7$	$a_7$	
$A_7$		$A_7$	$a_7$	
$a_7$		$a_7$	$A_7$	

**Le graphe de Coxeter généralisé, modules et dimensions.**

Le graphe  $B_4$  n'apparaît pas explicitement parmi les sous-graphes qui composent le graphe de symétries quantiques, mais on sait que le graphe non simplement lacé  $B_4$  est un module à droite et à gauche sur  $A_7$  et un module sur  $Oc(B_4)$ . Le graphe  $B_4$  et sa matrice d'adjacence sont montrés dans la Figure 3.9.



FIG. 3.9 – Le graphe de Coxeter  $B_4$  et sa matrice d'adjacence  $Ad(B_4)$

L'action de  $A_7$  sur  $B_4$  est codée par des constantes de structure  $(F_i)_{ab}$  où  $a$  et  $b$  sont des vertex de  $B_4$ . Les matrices  $F_i$  sont des matrices de dimension  $4 \times 4$  obtenues à partir des relations de récurrence codées par le graphe  $A_7$

$$F_i = F_1.F_{i-1} - F_{i-2} \text{ pour } 2 \leq i \leq 6$$

avec générateur  $F_1 = Ad(B_4)$  et unité  $F_0 = \mathbb{I}_4$ . La forme explicite de ces matrices est la suivante

$$F_0 = F_6 = \mathbb{I}_4; \quad F_1 = F_5 = Ad(B_4)$$

$$F_2 = F_4 = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 \\ 1 & \cdot & 2 & \cdot \\ \cdot & 2 & \cdot & 1 \end{pmatrix} \quad F_3 = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ \cdot & \cdot & 2 & \cdot \\ \cdot & 2 & \cdot & 1 \\ 2 & \cdot & 2 & \cdot \end{pmatrix} \tag{3.41}$$

L'action de  $Oc(B_4)$  sur  $B_4$  est codée par les constantes de structure  $(S_x)_{ab}$ , ce sont des matrices de dimension  $4 \times 4$ , calculées à partir des relations de récurrence codées par le graphe  $Oc(B_4)$  avec générateurs chiraux  $S_{1+} = S_{1-} = Ad(B_4)$  et unités  $S_{0+} = S_{0-} = \mathbb{I}_4$ . Comme

pour le cas  $B_3$  ces matrices  $S_x$  peuvent être aussi obtenues à partir de la réalisation de l'algèbre de symétries quantiques. L'action à gauche  $(i, \pm) a = \sum_{b \in B_3} (S_{i\pm})_{ba} b$  est définie de manière naturelle par les relations

$$(i, +) a \equiv i a = \sum_{b \in B_4} (F_i)_{ba} b \Rightarrow S_{i+} = F_i \quad (3.42)$$

$$(i, -) a \equiv i a = \sum_{b \in B_4} (F_i)_{ba} b \Rightarrow S_{i-} = F_i \quad (3.43)$$

**Règle de somme quadratique.** De manière similaire aux cas  $F_4$  et  $B_3$  nous appelons  $d_i$  et  $d_x$  les analogues des dimensions des blocs simples associés au graphe  $B_4$ . La liste des dimensions des blocs de type  $i$  et  $x$  est respectivement

$$d_i = \{4, 7, 9, 10, 9, 7, 4\}$$

$$d_x = \{4, 7, 9, 10, 9, 7, 4, 4, 7, 9, 10, 9, 7, 4\}$$

La somme des dimensions carrés donne

$$\sum_{x \in Oc(B_3)} d_x^2 = 2 \times \sum_{i \in A_5} d_i^2 = 784$$

grâce au fait qu'il n'y a pas de double liens dans le graphe d'Ocneanu, il n'est pas nécessaire d'introduire des facteurs  $\frac{1}{2}$  dans certaines des dimensions des blocs de type  $x$ .

**Règle de somme linéaire.** Encore en analogie avec les cas  $ADE$ , on étudie la somme linéaire des dimensions  $d_i$  et  $d_x$ . On trouve

$$\sum_{x \in Oc(B_3)} d_x = 2 \times \sum_{i \in A_5} d_i = 100$$

résultat qui est à nouveau consistant avec ceux obtenus préalablement.

**Autres actions des modules associés.** De la même façon que dans l'exemple précédant l'identification de la fonction de partition  $Z_{B_4}$  avec le graphe non simplement lacé  $B_4$  est établie grâce aux relations de module à droite et à gauche sur le graphe principal  $A_7$  et le graphe de symétries quantiques  $Oc(B_4)$  qui a été construit à partir de  $Z_{B_4}$ . Mais de manière similaire au cas  $B_3$ , il s'avère que le graphe de la famille de nombre de Coxeter huit,  $D_5$ , est aussi un module sur  $A_7$  et  $Oc(B_4)$ .

L'action de  $A_7$  sur  $D_5$  est donnée de la manière naturelle par les matrices  $F_i$  qu'on sait bien définies puisque le nombre de Coxeter est le même. Dans ce cas, les matrices  $F_i$  ont dimension  $5 \times 5$  et sont calculés à partir des relations de récurrence du graphe  $A_7$  avec générateur  $F_1^{D_5} = Ad(D_5)$ . La forme explicite de ces matrices est déjà bien connue [66],[26]. La règle de somme quadratique est comme suit

$$d_i^{D_5} = \{5, 8, 11, 12, 11, 8, 5\} \Rightarrow \sum_{i \in A_5} (d_i^{D_4})^2 = 564$$

L'action de  $Oc(B_4)$  sur  $D_5$  est codée par les matrices  $S_x^{D_5}$ . Ce sont des matrices de dimension  $5 \times 5$  calculées à partir des relations de récurrence du graphe  $Oc(B_4)$  avec générateurs chiraux  $S_{1+}^{D_5} = S_{1-}^{D_5} = Ad(D_5)$ . La forme explicite de ces matrices est

$$S_{0+}^{D_5} = S_{0-}^{D_5} = \mathbb{I}_5; \quad S_{1+}^{D_5} = S_{5+}^{D_5} = S_{5-}^{D_5} = S_{1-}^{D_5} = Ad(D_5);$$

$$S_{3+}^{D_5} = S_{3-}^{D_5} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & 1 & 1 \\ \cdot & \cdot & 2 & \cdot & \cdot \\ \cdot & 2 & \cdot & 1 & 1 \\ 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \quad S_{6+}^{D_5} = S_{6-}^{D_5} = \begin{pmatrix} 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \end{pmatrix} \quad (3.44)$$

$$S_{2+}^{D_5} = S_{4+}^{D_5} = S_{4-}^{D_5} = S_{2-}^{D_5} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & 1 \\ 1 & \cdot & 2 & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot & 1 \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot \end{pmatrix}$$

Les dimensions et la règle de somme quadratique est la suivante

$$d_x^{D_4} = \{5, 8, 11, 12, 11, 8, 5, 5, 8, 11, 12, 11, 8, 5\} \Rightarrow \sum_{i \in A_5} (d_i^{D_4})^2 = 1128$$

On voit que la relation  $\sum_x (d_x)^2 = 2 \times \sum_i (d_i)^2$  est satisfaite. On pourrait alors être amené à considérer les symétries quantiques associées à la fonction de partition  $Z_{B_4}$  comme celles liées à n'importe quel graphe de la famille de graphes de  $SU(2)$  avec  $\kappa = 8$ . La notation  $B_4$  reste le meilleur choix parce que  $D_5$  a déjà été associée à un groupoïde quantique, et parce que les exposants de  $B_4$  coïncident avec les entrées diagonales non zéro de la matrice  $M_{B_4}$ .

### 3.2.4 Le cas général $B_n$

<sup>3</sup> On considère la fonction de partition invariante modulaire associée au graphe principal  $A_{(2n-1)}$ .

$$Z_{A_{(2n-1)}} = |\chi_0|^2 + |\chi_1|^2 + |\chi_2|^2 + \cdots + |\chi_{2(n-1)}|^2 \quad (3.45)$$

La nombre de Coxeter est  $\kappa = 2n$  et le niveau est  $l = 2(n-1)$ . L'action du générateur  $S$  sur le vecteur caractère de l'algèbre de fusion sur la combinaison des caractères  $\chi_0 + \chi_2 + \cdots + \chi_4$  est

---

<sup>3</sup>Les résultats consignés ici se basent sur un étude de plusieurs cas particuliers. Nous n'avons pas effectué la démonstration formelle des propriétés énoncées pour le cas générique  $B_n$

envoyé dans une combinaison linéaire de ces mêmes exposants, on propose une sous-fonction de partition que l'on notera avec le sous-index  $B_n$  puisque les entrées diagonales de l'invariant modulaire correspondent aux exposants du graphe  $B_n$ .

$$Z_{B_n} = |\chi_0|^2 + |\chi_2|^2 + \cdots + |\chi_{2(n-1)}|^2 \quad M_{B_n} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (3.46)$$

La fonction de partition  $Z_{B_n}$  est invariante sous l'action du sous-groupe de congruence du groupe modulaire  $\Gamma_0(2)$  généré par les deux matrices  $T$  et  $S^{-1}T^{-2}S$ .

**Matrices Toriques.** Le membre de gauche de l'équation (3.1.2) donne une famille de  $(2n-1)^2$  matrices  $K_{ij}$  de dimension  $(2n-1) \times (2n-1)$ . L'espace vectoriel engendré par cet ensemble de matrices est de dimension  $r = 2 \times (2n-1) - 1$ , et la dimension de l'algèbre de symétries quantiques est  $\dim Oc(B_n) = 2 \times (2n-1)$

$$W_{0,0} = MW_{x,y} = \text{Equacionesacorrerir!!}$$

### Le graphe d'Ocneauu et l'algèbre de symétries quantiques.

Les deux générateurs chiraux du graphe de Ocneauu  $V_{10}$  et  $V_{01}$  toriques on la forme suivante

$$V_{10} = \left( \frac{Ad(A_{2n-1}) \mid \cdot}{\cdot \mid Ad(A_{2n-1})} \right) \quad V_{01} = \left( \frac{\cdot \mid Ad(A_{2n-1})}{Ad(A_{2n-1}) \mid \cdot} \right) \quad (3.47)$$

ou  $Ad(A_{2n-1})$  est la matrice d'adjacence du graphe  $A_{2n-1}$ . Ces deux matrices sont les matrices d'adjacence du graphe d'Ocneauu, qui est présenté Figure 3.10.

L'algèbre de symétries quantiques est réalisée comme  $Oc(B_n) = A_{2n-1} \rtimes \mathbb{Z}_2$ , les labels de la Figure 3.10 correspondent à la notation des éléments de la base  $i \pm$ , ou  $i$  dénote les vertex du graphe  $A_{2n-1}$ . Le produit dans  $Oc(B_n)$  est défini comme

$$(i, +) \circ (j, +) = (ij, +) \quad (i, +) \circ (j, -) = (ij, -) \quad (3.48)$$

$$(i, -) \circ (j, +) = (i(j), -) \quad (i, -) \circ (j, -) = (i(j), +)$$

Les matrices  $O_x$  que donnent les constants de structure de  $Oc(B_n)$  sont exprimées en termes des matrices de fusion de  $A_{2n-1}$ .

$$O_{(i,+)} = \left( \frac{N_i \mid \cdot}{\cdot \mid N_i} \right) \quad O_{(i,-)} = \left( \frac{\cdot \mid N_i}{N_i \mid \cdot} \right) \quad (3.49)$$

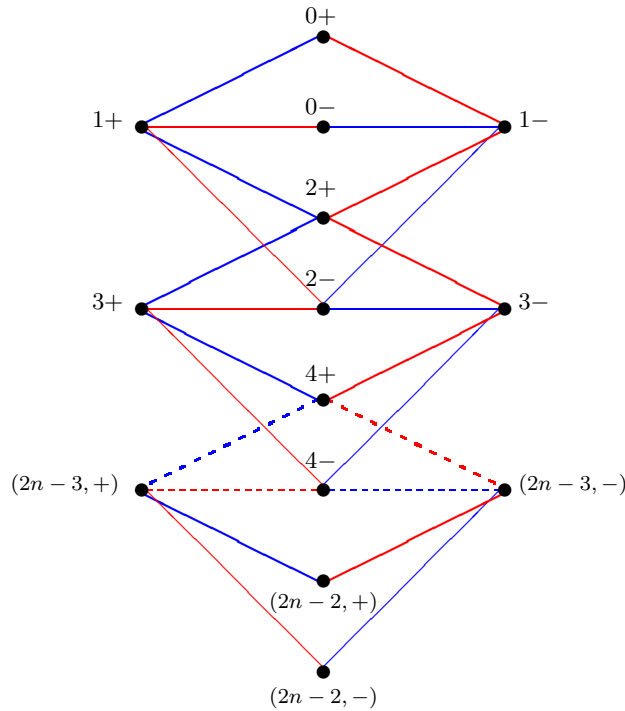


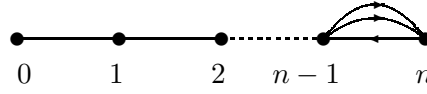
FIG. 3.10 – Graphe d’Ocneanu de  $B_n$

Le graphe de symétries quantiques est le graphe de Cayley de la multiplication par le générateur gauche et droit, chaque partie chirale est composée par l’union de deux graphes disjoints de type  $A_{2n-1}$ . Le premier  $A_{2n-1}$  est une sous-algèbre du graphe  $Oc(B_n)$ . Le deuxième  $a_{2n-1}$  est un sous-graphe module sur  $A_{2n-1}$ . La table de multiplication est construite à partir de la table de multiplication de  $A_{2n-1}$ .

$\times$	$A_{2n-1}$	$a_{2n-1}$
$A_{2n-1}$	$A_{2n-1}$	$a_{2n-1}$
$a_{2n-1}$	$a_{2n-1}$	$A_{2n-1}$

**Le graphe de Coxeter généralisé, modules et dimensions.**

Le graphe  $B_n$  n’apparaît pas explicitement parmi les sous-graphes qui composent le graphe de symétries quantiques, mais  $B_n$  est un module à droite et à gauche sur  $A_{2n-1}$  et  $Oc(B_n)$ . Le graphe  $B_n$  et sa matrice d’adjacence sont montrés la Figure 3.11

FIG. 3.11 – Le graphe de Coxeter  $B_n$ .

L'action de  $A_{2n-1}$  sur  $B_n$  est codée par les matrices  $F_i$  obtenues à partir des relations de récurrence du graphe  $A_{2n-1}$ , avec générateur  $F_1 = Ad(B_n)$  et unité  $F_0 = \mathbb{I}_n$ .

$$F_0 = \mathbb{I}_n; \quad F_1 = Ad(B_n); \quad F_n = F_1 F_{n-1} - F_{n-2} \quad n \geq 2 \quad (3.50)$$

L'action de  $Oc(B_n)$  sur  $B_n$  est codée par les matrices  $S_x$  calculées à partir des relations de récurrence du graphe  $Oc(B_n)$  (deux copies des relation de récurrence du graphe  $A_{2n-1}$ ) avec générateurs chiraux  $S_{1+} = S_{1-} = Ad(B_3)$  et unités  $S_{0+} = S_{0-} = \mathbb{I}_3$ . On a partir de la réalisation de l'algèbre des symétries quantiques :

$$(i, +) a \equiv i a = \sum_{b \in B_3} (F_i)_{ba} b \Rightarrow S_{i+} = F_i \quad (3.51)$$

$$(i, -) a \equiv i a = \sum_{b \in B_3} (F_i)_{ba} b \Rightarrow S_{i-} = F_i \quad (3.52)$$

**Règle de somme quadratique et linéaire.** Les listes des dimensions des blocs de type  $i$  et  $x$  sont

$$d_i = \{n, n + (n - 1), \dots, n + (n - 1) + (n - 2) \cdots + 1, \dots, n + (n - 1), n\}$$

$$d_x = \{n, n + (n - 1), \dots, n + (n - 1), n, n, n + (n - 1), \dots, n + (n - 1), n\}$$

A partir de ces listes, il est évident que les règles de somme quadratique et linéaire satisfont

$$\sum_{x \in Oc(B_3)} d_x^2 = 2 \times \sum_{i \in A_5} d_i^2$$

$$\sum_{x \in Oc(B_3)} d_x = 2 \times \sum_{i \in A_5} d_i$$

sans avoir besoin d'introduire les coefficients  $\frac{1}{2}$ .

### 3.2.5 Le cas $G_2$ .

On considère maintenant la fonction de partition invariante modulaire associée au graphe de nombre de Coxeter six,

$$Z_{D_4} = |\chi_0 + \chi_4|^2 + 2|\chi_2|^2 \quad (3.53)$$

Cette fonction de partition est définie par l'invariant modulaire diagonale par blocs  $M_{D_4}$ . On considère une restriction de cet invariant modulaire qui est invariant sous l'action du sous-groupe de congruence du groupe modulaire  $\Gamma^0(3)$ .

$$M_{G_2} = \begin{pmatrix} 1 & . & . & . & 1 \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ 1 & . & . & . & 1 \end{pmatrix} \quad (3.54)$$

L'invariance de la sous-fonction de partition générée par cette matrice modulaire sous l'action du  $\Gamma^0(3)$  est vérifié par la commutation de  $M_{G_2}$  avec la représentation de dimension 5 de ces deux générateurs  $T$  et  $S^{-1}T^{-3}S$ . Le sous-index  $G_2$  est choisie parce que les entrées diagonales de la matrice modulaire coïncident avec les exposants du du graphe de Dynking non-simplement lacé  $G_2$ .

**Scission Modulaire.** Le membre gauche de l'équation (3.1.2) donne une famille de 25 matrices  $K_{ij}$  de dimension  $5 \times 5$ . L'espace vectoriel engendré par cet ensemble de matrices est de dimension  $r = 9$ .  $G_2$  est un graphe non-simplement lacé et pour cela on s'attend à ce que la dimension de l'algèbre des symétries quantiques soit plus grande que  $r$ .

- **Norme 1 :** Les matrices  $K_{0,0}, K_{0,1}, K_{1,0}, K_{1,1}$  sont de norme 1 et donnent 4 matrices torique  $W_{x,0}$  comment suit  $W_{0,0} = K_{0,0}, W_{1,0} = K_{0,1}, W_{3,0} = K_{1,0}, W_{4,0} = K_{1,1}$
- **Norme 2 :** Il y a quatre matrices de norme deux :  $K_{0,2}, K_{1,2}, K_{2,0}$  et  $K_{2,1}$ . Ce sont des matrices avec des entrées multiples de deux. Cela veut dire que chaque matrice se décompose en somme de deux fois la même matrice torique que l'on note  $\hat{W}_{x,0}$ . Ainsi on a  $\hat{W}_{2,0} = \frac{1}{2}K_{0,2}, \hat{W}_{5,0} = \frac{1}{2}K_{1,2}, \hat{W}_{6,0} = \frac{1}{2}K_{2,0}$  et  $\hat{W}_{7,0} = \frac{1}{2}K_{2,1}$
- **Norme 4 :** Il y a une matrice de norme quatre  $K_{2,2}$ . Cette matrice a des entrées multiples de quatre, elle se décompose donc en quatre fois la même matrice torique  $\hat{W}_{8,0} = \frac{1}{4}K_{2,2}$ .

On définit de cette manière neuf matrices toriques différentes que l'on présente explicitement

$$\begin{aligned}
W_{0,0} &= M \\
W_{1,0} = W_{3,0}^{tr} &= \begin{pmatrix} \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot \end{pmatrix} & \hat{W}_{2,0} = \hat{W}_{6,0}^{tr} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \\
W_{4,0} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} & \hat{W}_{5,0} = \hat{W}_{7,0}^{tr} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \\
\hat{W}_{8,0} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

La notation  $\hat{W}_{x,0}$  identifie les matrices qui apparaissent avec multiplicité plus grande que 1 dans la décomposition d'une matrice  $K_{ij}$ . Comme pour le cas  $F_4$ , l'équation de *Scission Modulaire* est satisfaite en rajoutant à droite, la multiplicité qui correspond à chaque matrice torique, on a ainsi pour le cas  $G_2$

$$(N_i^{tr} M N_j) = \sum_{x \in \{0,3,4\}} (W_{x,0})_{ij} W_{x,0} + \sum_{x \in \{2,5,6,7\}} \mathbf{2}(\hat{W}_{x,0})_{ij} \hat{W}_{x,0} + \mathbf{4}(\hat{W}_{8,0})_{ij} \hat{W}_{8,0} \quad (3.55)$$

Les coefficients deux et quatre sont interprétés de deux manières différentes :

- La première interprétation consiste à définir  $W_{0,x} = 2 \times W_{x,0}$  pour  $x \in \{2, 5, 6, 7\}$ ,  $W_{0,8} = 4 \times W_{8,0}$  et  $W_{0,x} = W_{x,0}$  pour  $x \in \{1, 2, 4\}$ . Dans ce cas on a une algèbre de symétries quantiques de dimension  $\dim Oc = 9$ , et le graphe d'Ocneanu est composé par des graphes non simplement lacés.
- La deuxième interprétation consiste à considérer que les matrices  $W_{0,x}$  sont égales aux matrices  $W_{x,0}$  pour tous les vertex, et les coefficients sont dues à la multiplicité des matrices  $\hat{W}_{x,0}$ . On a alors une algèbre de symétries quantiques de dimension  $\dim Oc = 16$  avec les matrices toriques  $\hat{W}_{2,0}$ ,  $\hat{W}_{5,0}$ ,  $\hat{W}_{6,0}$ ,  $\hat{W}_{7,0}$  associées chacune à deux vertex du graphe d'Ocneanu et la matrice  $\hat{W}_{8,0}$  associée à quatre vertex de ce graphe.

**Le graphe d’Ocneanu et l’algèbre des symétries quantiques.**

**S1. Première solution :**  $\hat{W}_{0,z} = 2\hat{W}_{z,0}$ . On considère d’abord le cas où l’algèbre des symétries quantiques est de  $\dim Oc = 9$ , le graphe d’Ocneanu a donc neuf points, les solutions de (2.10) pour les paires  $(i, j)$  égal à  $(0, 1)$  et à  $(1, 0)$  donnent les deux générateurs chiraux  $V_{10}$  et  $V_{01}$  respectivement qui, dans l’ordre choisi pour les matrices toriques, ont la forme suivante :

$$V_{10} = \begin{pmatrix} \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & 2 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & 2 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & 2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{pmatrix} \quad V_{01} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 2 & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 2 & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \quad (3.56)$$

Ces deux matrices sont les matrices d’adjacence des parties chirales gauche et droite du graphe d’Ocneanu. Ce dernier est montré Figure (3.12). A partir des matrices  $V_{00} = \mathbb{I}$ ,  $V_{10}$  et

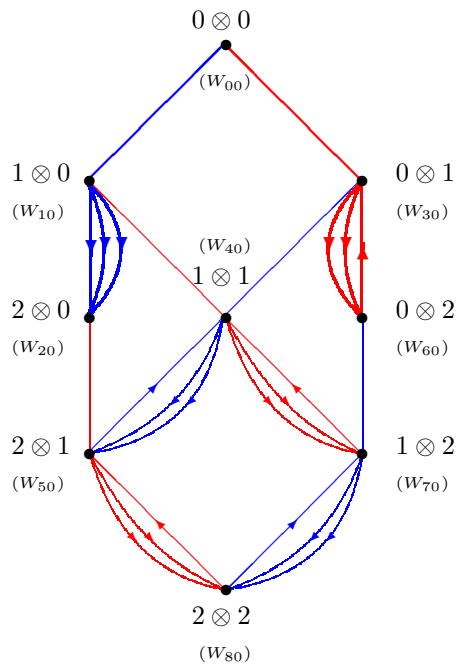


FIG. 3.12 – Graphe d’Ocneanu de  $G_2$ , à neuf points.

$V_{01}$ , les équations (2.17), (2.18) et (2.19) permettent de récupérer de manière automatique les matrices de double fusion  $V_{ij}$ , et à partir des matrices toriques twistées  $W_{xy}$ .

L’algèbre de symétries quantiques est réalisée comme  $Oc(G_2) = B_3 \otimes B_3$ . Les étiquettes de la Figure 3.12 correspondent à la notation des éléments de la base  $a \otimes b$ , où  $a$  et  $b$  dénotent les vertex du graphe  $B_3$ . L’identification entre les notations est la suivante

$x \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\} \rightarrow \{0 \otimes 0, 1 \otimes 0, 2 \otimes 0, 0 \otimes 1, 1 \otimes 1, 2 \otimes 1, 0 \otimes 2, 1 \otimes 2, 2 \otimes 2\}$ .

Le produit dans  $Oc(G_2)$  est défini par  $(a \otimes b)(c \otimes d) = ac \otimes bd = (G_a)_{ec}(G_b)_{fd}(e \otimes f)$  où les matrices  $G_a$  sont les constantes de structure du graphe  $B_3$ .

Une représentation  $9 \times 9$  de l'algèbre des symétries quantiques est donnée par les matrices  $O_x$  qui sont calculées à partir des relations de récurrence du graphe  $Oc(G_2)$  et en termes des deux générateurs  $O_{1 \otimes 0} = V_{10}$  et  $O_{0 \otimes 1} = V_{01}$  comme suit

$$\begin{array}{l|l} O_{2 \otimes 0} = (O_{1 \otimes 0})^2 - O_{0 \otimes 0} & O_{1 \otimes 1} = O_{1 \otimes 0} O_{0 \otimes 1} \\ O_{2 \otimes 1} = (O_{1 \otimes 0})^2 O_{0 \otimes 1} - O_{0 \otimes 1} & O_{0 \otimes 2} = (O_{0 \otimes 1})^2 - O_{0 \otimes 0} \\ O_{1 \otimes 2} = (O_{0 \otimes 1})^2 O_{1 \otimes 0} - O_{1 \otimes 0} & O_{2 \otimes 2} = (O_{1 \otimes 0})^2 (O_{0 \otimes 1})^2 - (O_{0 \otimes 1})^2 \end{array} \quad (3.57)$$

Elles peuvent être exprimées de manière compacte à partir des matrices de fusion de  $A_5$ .

$$O_{(a \otimes 0)} = \left( \begin{array}{c|c|c} G_a & \cdot & \cdot \\ \cdot & G_a & \cdot \\ \cdot & \cdot & G_a \end{array} \right) \quad O_{(a \otimes 1)} = \left( \begin{array}{c|c|c} \cdot & G_a & \cdot \\ G_a & \cdot & 2G_a \\ \cdot & G_a & \cdot \end{array} \right) \quad O_{(a \otimes 2)} = \left( \begin{array}{c|c|c} \cdot & \cdot & 2G_a \\ \cdot & 2G_a & \cdot \\ G_a & \cdot & G_a \end{array} \right) \quad (3.58)$$

Ces matrices fournissent les constantes de structure de l'algèbre de symétries quantiques.

Chaque partie chirale est composée par l'union de trois copies disjointes du graphe  $B_3$ . La première  $B^l = \{0 \otimes 0, 1 \otimes 0, 2 \otimes 0\}$ , ou  $B^r = \{0 \otimes 0, 0 \otimes 1, 0 \otimes 2, 1 \otimes 2\}$ , est une sous-algèbre de graphe  $B_3$ . La deuxième et la troisième copie :  $b_1^l = \{0 \otimes 1, 1 \otimes 1, 2 \otimes 1\}$ , ou  $b_1^r = \{1 \otimes 0, 1 \otimes 1, 1 \otimes 2\}$ , et  $b_2^l = \{0 \otimes 2, 1 \otimes 2, 2 \otimes 2\}$ , ou  $b_1^r = \{2 \otimes 0, 2 \otimes 1, 2 \otimes 2\}$  sont des sous-modules sur la sous-algèbre  $B_3$  respective. Les super indices  $l$  et  $r$  dénotent la sous algèbre chirale gauche et droite respectivement. La table de multiplication peut être construite à partir de la table de multiplication de  $B_3$ .

$\times$	$B$	$b_1$	$b_2$
$B$	$B$	$b_1$	$b_2$
$b_1$	$b_1$	$B + b_2$	$b_1$
$b_2$	$b_2$	$b_1$	$B + b_2$

**Le graphe de Coxeter généralisé, modules et dimensions.** Le graphe  $G_2$  n'apparaît pas explicitement parmi les sous-graphes qui composent le graphe de symétries quantiques, mais  $G_2$  est un module à droite et à gauche sur  $A_5$  et sur l'algèbre de symétries queantiques  $Oc(G_2)$ . Le graphe  $G_2$  et sa matrice de adjacence sont montrés Figure 3.13

L'action de  $A_5$  sur  $G_2$  est codée par les matrices  $F_i$  obtenues à partir des relations de récurrence codées par le graphe  $A_5$ , avec générateur  $F_1 = Ad(G_2)$  et unité  $F_0 = \mathbb{I}_3$ .

$$F_0 = F_4 = \mathbb{I}_2; \quad F_1 = F_3 = Ad(G_2); \quad F_2 = 2 \times \mathbb{I}_2 \quad (3.59)$$

L'action de  $Oc(G_2)$  sur  $G_2$  est codée par les matrices  $S_x$ . Ce sont des matrices  $2 \times 2$  donnant une représentation de l'algèbre des symétries quantiques. Les matrices  $S_x$  peuvent



FIG. 3.13 – Le graphe de Coxeter  $B_3$  et sa matrice d'adjacence  $Ad(B_3)$

être calculées par deux méthodes différentes : une première méthode considère le fait que les matrices  $S_x$  forment une représentation de l'algèbre des symétries quantiques. Elles peuvent être calculées en utilisant les relation de récurrence des matrices  $O_x$ , à partir des générateurs chiraux  $S_{1\otimes 0} = S_{0\otimes 1} = Ad(G_2)$ , où  $Ad(G_2)$  est la matrice d'adjacence de  $G_2$ . On utilisera alors les relations (3.57) pour calculer les matrices  $S_x$ .

La deuxième méthode utilise la réalisation de  $Oc(G_2)$ . L'action de  $Oc(G_2)$  sur le graphe  $G_2$  est donnée normalement par

$$x p = (a \otimes b) p \equiv a (b p)$$

où  $a$  et  $b$  indiquent les vertex du graphe  $B_3$  et  $p$  les vertex du graphe  $G_2$ . On se sert de l'action du graphe  $B_3$  sur le graphe  $G_2$ . Cette dernière est bien définie et est codée par les trois matrices :

$$s_0^g = \begin{pmatrix} 1 & . \\ . & 1 \end{pmatrix} \quad s_1^g = \begin{pmatrix} . & 1 \\ 3 & . \end{pmatrix} \quad s_2^g = \begin{pmatrix} 2 & . \\ . & 2 \end{pmatrix}$$

Les matrices  $S_x$  sont définies alors comme  $S_x = s_a^g s_b^g$  où  $x = a \otimes_J b$ . La liste des matrices donnant l'action de  $Oc(G_2)$  sur  $G_2$  est la suivante

$$S_{0\otimes 0} = \begin{pmatrix} 1 & . \\ . & 1 \end{pmatrix} \quad S_{1\otimes 0} = S_{0\otimes 1} = \begin{pmatrix} . & 1 \\ 3 & . \end{pmatrix} \quad S_{2\otimes 0} = S_{0\otimes 2} = \begin{pmatrix} 2 & . \\ . & 2 \end{pmatrix}$$

$$S_{1\otimes 1} = \begin{pmatrix} 3 & . \\ . & 3 \end{pmatrix} \quad S_{2\otimes 1} = S_{1\otimes 2} = \begin{pmatrix} . & 2 \\ 6 & . \end{pmatrix} \quad S_{2\otimes 2} = \begin{pmatrix} 4 & . \\ . & 4 \end{pmatrix}$$

**Règle de somme quadratique.** La liste des dimensions des blocs simples des algèbres  $A_5$  et  $Oc(G_2)$  sont les suivantes

$$d_i = \{2, 4, 4, 4, 2\}$$

$$d_x = \{2, 4, 4, 4, 6, 8, 4, 8, 8\}$$

La somme des dimensions des blocs de type  $A_5$  donne comme résultat  $\sum_{i \in A_{11}} d_i^2 = 56$ . On observe que cette valeur est le tiers de la dimension du même type pour le graphe  $D_4$ , ce qui est attendu puisque  $G_2$  est le pliage  $\mathbb{Z}_3$  du graphe  $D_4$ . La relation entre la somme des

dimensions carrés est la suivante

$$\sum_{x \in Oc(G_2)} \frac{1}{n_x} d_x^2 = 3 \times \sum_{i \in A_5} d_i^2 = 168$$

où le facteur  $n_x$  est égal à 2 pour  $x = \{2 \otimes 0, 0 \otimes 2, 2 \otimes 1, 1 \otimes 2\}$ ,  $n_{2 \otimes 2} = 4$  et est égal à 1 pour tous les autres. C'est à dire que l'on introduit un facteur égal au coefficient du vertex  $x$ . Le facteur global 3 correspond au fait que  $G_2$  est un  $\mathbb{Z}_3$  pliage du graphe  $D_4$ .

**S2. Deuxième solution :**  $W_{z,0} = W_{0,z}$  plus multiplicités.

On considère maintenant une solution à l'équation de *scission modulaire* dans laquelle les matrices toriques satisfont la relation (2.14), mais ces matrices apparaissent avec multiplicité. La conjugaison dans  $SU(2)$  est triviale, et donc la relation (2.14) est simplement  $W_{z,0} = W_{0,z}$ . Les matrices toriques sont les mêmes huit matrices que l'on a déjà calculé pour  $G_2$ , mais elles apparaissent avec repetitions.

$$W_{2,0} = W_{2\epsilon,0} = \hat{W}_{2,0} \quad W_{5,0} = W_{5\epsilon,0} = \hat{W}_{5,0}$$

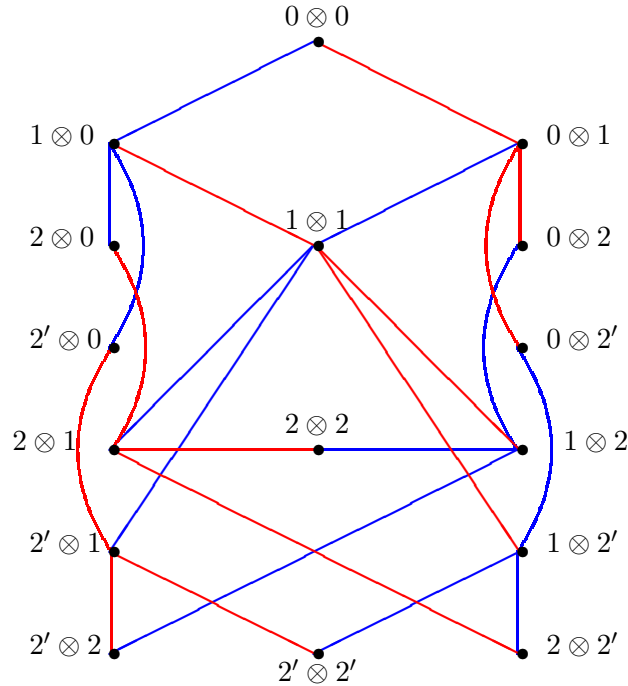
$$W_{6,0} = W_{6\epsilon,0} = \hat{W}_{6,0} \quad W_{7,0} = W_{7\epsilon,0} = \hat{W}_{7,0}$$

$$W_{8,0} = W_{8\epsilon,0} = W_{8\epsilon\epsilon,0} = W_{8\epsilon\epsilon\epsilon,0} = \hat{W}_{8,0}$$

La dimension de l'algèbre des symétries quantiques est  $d_O = 16$ , les générateurs chiraux  $V_{10}$  et  $V_{01}$  (en choisissant un ordre approprié pour les vertex  $z$ ) ont la forme explicite suivante :

$$V_{10} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ 1 & . & 1 & 1 & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & 1 & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & 1 & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & 1 & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & 1 & 1 & 1 & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & 1 & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & 1 & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & 1 & 1 & 1 & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & 1 & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & 1 & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & 1 & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & 1 & 1 & 1 & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & 1 & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & 1 & . & . & . \end{pmatrix}$$



FIG. 3.14 – Graphe d'Ocneanu de  $G_2$ , a seize points.

symétries quantiques, on a besoin de trois générateurs supplémentaires,  $2 \otimes 0$ ,  $2 \otimes 2$  et  $2' \otimes 2'$ , pour pouvoir séparer les deux branches de chaque graphe  $D_4$ . Une représentation  $16 \times 16$  de l'algèbre de symétries quantiques est donnée par les matrices  $O_x$  qui sont calculées à partir des relations de récurrence du graphe  $Oc(G_2)$ . Pour effectuer ce calcul, nous avons besoin des deux générateurs  $O_{1 \otimes 0} = V_{10}$  et  $O_{0 \otimes 1} = V_{01}$ , l'identité  $O_{0 \otimes 0}$ , et les trois matrices  $O_{2 \otimes 0}$ ,  $O_{2 \otimes 2}$ ,  $O_{2' \otimes 2'}$ . Ces derniers sont calculés à partir de équations suivantes. La **Propriété 5** (Chapitre 1) indique que chaque matrice doit satisfaire l'équation

$$W_{x,y} = \sum_z (O_x)_{z,y} W_{0,z} .$$

A partir du graphe, nous pouvons lire que les matrices  $O_{2 \otimes 0}$ ,  $O_{2 \otimes 2}$ ,  $O_{2' \otimes 2'}$  doivent satisfaire les équations

$$\begin{array}{l} O_{2 \otimes 0} \cdot O_{1 \otimes 0} = O_{1 \otimes 0} \\ O_{2' \otimes 0} = (O_{1 \otimes 0})^2 - O_{2 \otimes 0} - O_{0 \otimes 0} \\ O_{2 \otimes 0} \cdot O_{1 \otimes 0} = O_{1 \otimes 0} \end{array} \left| \begin{array}{l} O_{2 \otimes 2} \cdot O_{0 \otimes 1} = O_{2 \otimes 1} \\ O_{2 \otimes 2'} = O_{0 \otimes 1} \cdot O_{2 \otimes 1} - O_{2 \otimes 2} - O_{2 \otimes 0} \\ O_{2 \otimes 2'} \cdot O_{0 \otimes 1} = O_{2 \otimes 1} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} O_{2' \otimes 2'} \cdot O_{0 \otimes 1} = O_{2' \otimes 1} \\ O_{2' \otimes 2} = O_{0 \otimes 1} \cdot O_{2' \otimes 1} - O_{2' \otimes 2'} - O_{2' \otimes 0} \\ O_{2' \otimes 2} \cdot O_{0 \otimes 1} = O_{2' \otimes 1} \end{array} \right. \quad (3.60)$$

Ce système d'équations plus la contrainte d'avoir des matrices avec des entrées entières et positives, est suffisante pour déterminer les trois générateurs supplémentaires. Notons que la solution de ces équations implique automatiquement que nous avons aussi les matrices  $O_{2' \otimes 0}$ ,  $O_{2' \otimes 2}$  et  $O_{2' \otimes 2'}$ . Les autres matrices s'obtiennent directement à partir des relations de récurrence du graphe.

Le produit dans  $Oc(G_2)$  est défini par  $(a \otimes b)(c \otimes d) = ac \otimes bd = (G_a)_{ec}(G_b)_{fd}(e \otimes f)$  où les matrices  $G_a$  sont les constants de structure du graphe  $D_4$ . Ceci permet d'écrire les matrices  $O_x$  de manière compacte

$$\begin{aligned}
 O_{(a \otimes 0)} &= \begin{pmatrix} G_a & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & G_a & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & G_a & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & G_a \end{pmatrix} & O_{(a \otimes 1)} &= \begin{pmatrix} \cdot & G_a & \cdot & \cdot \\ G_a & \cdot & G_a & G_a \\ \cdot & G_a & \cdot & \cdot \\ \cdot & G_a & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \\
 O_{(a \otimes 2)} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & G_a & \cdot \\ \cdot & G_a & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & G_a & \cdot \\ G_a & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} & O_{(a \otimes 2')} &= \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & G_a \\ \cdot & G_a & \cdot & \cdot \\ G_a & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & G_a & \cdot \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.61}$$

La table de multiplication peut être construite à partir de la table de multiplication de  $B_3$ .

$\times$	$D$	$d_1$	$d_2$	$d_2'$
$D$	$D$	$d_1$	$d_2$	$d_2'$
$d_1$	$d_1$	$D + d_2 + d_2'$	$d_1$	$d_1$
$d_2$	$d_2$	$d_1$	$b_2'$	$D$
$d_2'$	$d_2'$	$d_1$	$D$	$d_2$

où chaque bloc a la forme d'une table de multiplication de  $D_4$  mais avec les vertex correspondant au bloc.

$\times$	0	1	2	2'
0	0	1	2	2'
1	1	0 + 2 + 2'	1	1
2	2	1	2'	0
2'	2'	1	0	2

**Le graphe de Coxeter généralisé, modules et dimensions.** Le graphe  $G_2$  n'apparaît pas explicitement parmi les sous-graphes qui composent le graphe de symétries quantiques, mais  $G_2$  est un module à droite et à gauche sur  $A_5$  et sur l'algèbre de symétries queantiques  $Oc(G_2)$ . Le graphe  $G_2$  et sa matrice de adjacence sont montrées Figure 3.13 L'action de  $A_5$  sur  $G_2$  est codée par les matrices  $F_i$  obtenues à partir des relations de récurrence codée par le graphe  $A_5$ , avec générateur  $F_1 = Ad(G_2)$  et unité  $F_0 = \mathbb{I}_3$ .

$$F_0 = F_4 = \mathbb{I}_2; \quad F_1 = F_3 = Ad(G_2); \quad F_2 = 2 \times \mathbb{I}_2 \tag{3.62}$$

L'action de  $Oc(G_2)$  sur  $G_2$  est codée par les matrices  $S_x$ . Ce sont des matrices de dimension  $2 \times 2$  calculées en utilisant les relation de récurrence des matrices  $O_x$ , à partir des générateurs chiraux  $S_{1 \otimes 0} = S_{0 \otimes 1} = Ad(G_2)$ , où  $Ad(G_2)$  est la matrice d'adjacence de  $G_2$ . On utilisera alors les equation (3.60) pour calculer les matrices  $S_x$ . On trouve

$$S_{0\otimes 0} = \begin{pmatrix} 1 & \cdot \\ \cdot & 1 \end{pmatrix} \quad S_{1\otimes 0} = \begin{pmatrix} \cdot & 1 \\ 3 & \cdot \end{pmatrix} \quad S_{1\otimes 1} = \begin{pmatrix} 3 & \cdot \\ \cdot & 3 \end{pmatrix}$$

et nous avons

$$S_{0\otimes 0} = S_{2\otimes 0} = S_{2'\otimes 0} = S_{0\otimes 2} = S_{0\otimes 2'} = S_{2\otimes 2'} = S_{2'\otimes 2} .$$

$$S_{1\otimes 0} = S_{0\otimes 1} = S_{2\otimes 1} = S_{2'\otimes 1} = S_{1\otimes 2'} = S_{1\otimes 2} .$$

$$S_{1\otimes 1} = S_{2\otimes 2} = S_{2'\otimes 2'} .$$

**Règle de somme quadratique.** Les dimensions des blocs simples des algèbres  $A_5$  et  $Oc(G_2)$  sont les suivantes

$$d_i = \{2, 4, 4, 4, 2\}$$

$$d_x = \{2, 4, 2, 2, 4, 6, 4, 4, 2, 4, 2, 2, 2, 4, 2, 2\}$$

La somme des dimensions des blocs de type  $A_5$  donne  $\sum_{i \in A_{11}} d_i^2 = 56$ . On observe que cette valeur est le tiers de la dimension du même type pour le graphe  $D_4$ , ce qui est attendu puisque  $G_2$  est le pliage  $\mathbb{Z}_3$  du graphe  $D_4$ . La relation entre la somme des dimensions carrés est

$$\sum_{x \in Oc(G_2)} d_x^2 = 3 \times \sum_{i \in A_5} d_i^2 = 168 .$$

### 3.3 Un exemple non-simplement lacé du système $SU(3)$ .

Dans le système de graphes  $SU(3)$  on retrouve des graphes non simplement lacés parmi les graphes  $ADE$ , on peut considérer par exemple le graphe  $\mathcal{E}_9$  étudié dans le Chapitre II . Ces graphes sont associés aux fonctions de partition invariantes modulaires de type  $SU(3)$  qu'on connaît déjà. On s'intéresse à un groupe de fonctions de partition données par une restriction d'un invariant modulaire de type  $SU(3)$ , qui amènerait, par analogie avec les cas  $SU(2)$  qu'on vient de présenter, à une fonction de partition invariante sous l'action d'un sous-groupe de congruence de  $SL(2, \mathbb{Z})$ .

On considère le graphe exceptionnel  $\mathcal{E}_5$ , ce graphe a plusieurs symétries, notamment l'invariance sous l'action de  $\mathbb{Z}_3$  et  $\mathbb{Z}_6$  qui correspond à des rotations de  $2\frac{\pi}{3}$  et  $\frac{\pi}{3}$  autour du centre du graphe. L'étude des "pliages" des graphes de type  $SU(3)$  simplement lacés par une symétrie a été traité dans ([72]). Ici on considère l'étude d'une restriction de l'invariant modulaire  $\mathcal{E}_5$  du point de vue des symétries quantiques. On considère un graphe non-simplement lacé (obtenu par pliage) qu'on notera  $F_{\mathcal{E}_5}$ .

Ce graphe est défini par le pliage du graphe  $\mathcal{E}_5$  par l'automorphisme suivante ;

$$\sigma(1_i) = 1_{i+3 \text{ mod } 6}$$



**Scission Modulaire** Dans  $SU(3)$  les vertex du graphe principal  $\mathcal{A}_5$  sont étiquetés par des pair ordonnés  $(i_1, i_2)$  avec  $0 \leq i_{1,2} \leq 5$  et  $i_1 + i_2 \leq 5$ . Pour simplifier la notation on va introduire un index de position  $i, j, \dots \in \{0, 1, \dots, 20\}$  donnant la position d'un pair  $(i_1 i_2)$  comme

$$i = i_1 + 6i_2 \quad \text{pour}$$

Le membre gauche de la équation (3.1.2) définit une famille de 441 matrices  $K_{ij}$  de dimension  $21 \times 21$ , l'espace vectoriel engendré ces matrices a dimension  $r = 72$ .

On considère la décomposition des matrices  $K_{ij}$  sur une base de matrices à entrées entières non négatives avec de coefficients entiers également non négatif. La décomposition des 421 matrices définies par la matrice modulaire de  $F_{\mathcal{E}_5}$  est la suivante

- **Norme 1** Il y a 63 matrices  $K_{i,j}$  de norme carré égale à 1. La liste présentée à continuation donne la valeur des indexes des matrices de norme 1 :

$$\begin{aligned} &\bullet (i, 0), (i, 1), (i, 2), (i, 10), (i, 14), (i, 15), (i, 16), (i, 19), (i, 20) \quad \text{pour } i = \{0, 1, 2, 15, 16, 20\} \\ &\bullet (i, 0), (i, 15), (i, 20) \quad \text{pour } i = \{10, 14, 19\} \end{aligned}$$

Ces matrices de norme 1 définissent 63 matrices toriques comme suit

$$W_{z_{ij},0} = K_{i,j}$$

avec  $z_{ij} = \text{pos}(i, j)$  ou  $\text{pos}$  indique la position du pair d'index  $(i, j)$  dans la liste des 72 paires d'indices.

- **Norme 2** Il y a 9 matrices de norme deux :  $K_{0,3}, K_{0,5}, K_{0,6}, K_{3,0}, K_{3,15}, K_{3,20}, K_{5,0}, K_{5,15}, K_{5,20}$ . Ces neuf matrices se décomposent comme la somme de deux matrices toriques dont une matrice est déjà connue et une nouvelle matrice torique. Ceci définit les matrices toriques suivantes :

$$W_{3,0} = K_{0,3} - K_{0,14} \quad ; \quad W_{4,0} = K_{0,5} - K_{0,10} \quad ; \quad W_{5,0} = K_{0,6} - W_{0,19}$$

$$W_{30,0} = K_{3,0} - K_{14,0} \quad ; \quad W_{31,0} = K_{3,15} - K_{14,15} \quad ; \quad W_{32,0} = K_{3,20} - K_{14,20}$$

$$W_{33,0} = K_{5,0} - K_{10,0} \quad ; \quad W_{34,0} = K_{5,15} - K_{10,15} \quad ; \quad W_{35,0} = K_{5,20} - K_{10,20}$$

On obtient de cette manière un ensemble de 72 matrices toriques. L'ensemble des paires d'indices déterminant des matrices toriques est :

$$\begin{aligned} &\bullet (i, 0), (i, 1), (i, 2), (i, 10), (i, 14), (i, 15), (i, 16), (i, 19), (i, 20) \quad \text{pour } i = \{0, 1, 2, 15, 16, 20\} \\ &\bullet (i, 0), (i, 15), (i, 20) \quad \text{pour } i = \{3, 5, 10, 14, 19\} \\ &\bullet (0, 3), (0, 5), (0, 6) \end{aligned}$$

Les indices apparaissent dans l'ordre correspondant au graphe des symétries quantiques Figure 3.3 est l'ordre des paires  $(i, j)$  défini par les relations :

$$(i, j) \leq (i, j') \text{ ssi } j \leq j' \quad \text{et} \quad (i, j) \leq (i', j) \text{ ssi } i \leq i'$$

Contrairement au cas  $F_4$  (considéré comme l'analogie de  $SU(2)$ ), il n'y a pas de matrices apparaissant plus d'une fois dans la décomposition d'une matrice  $K_{ij}$ . C'est à dire qu'il n'y a pas de matrices avec multiplicité, ou satisfaisant la relation (3.2). Les matrices  $W_{0,z}$  sont reliées aux matrices  $W_{z,0}$  par la relation habituel  $(W_{0,z})_{ij} = (W_{z,0})_{i^*j^*}$ . L'ensemble complet des matrices toriques est trop grand pour être montré ici, mais tous les détails pour les calculer directement à partir de la matrice modulaire de  $F_{E_5}$  sont expliqués dans les paragraphes précédents. Certaines propriétés méritent d'être remarquées : Les matrices  $W_{0,0}$ ,  $W_{5,0}$ ,  $W_{13,0}$ ,  $W_{15,0}$ ,  $W_{23,0}$ ,  $W_{25,0}$ ,  $W_{31,0}$ ,  $W_{35,0}$ ,  $W_{47,0}$ ,  $W_{57,0}$ ,  $W_{58,0}$ ,  $W_{71,0}$  sont symétriques, elles correspondent à des vertex réels ou auto-conjugués du graphe d'Ocneau de  $F_{E_5}$ . D'autre part les relations suivantes déterminent les vertex reliés par l'opérateur chiral  $C$ .

$$\begin{aligned}
W_{1,0} &= W_{12,0}^{tr} & ; & & W_{2,0} &= W_{21,0}^{tr} & ; & & W_{3,0} &= W_{30,0}^{tr} & ; & & W_{4,0} &= W_{33,0}^{tr} & ; & & W_{6,0} &= W_{36,0}^{tr} \\
W_{7,0} &= W_{39,0}^{tr} & ; & & W_{8,0} &= W_{42,0}^{tr} & ; & & W_{9,0} &= W_{51,0}^{tr} & ; & & W_{10,0} &= W_{60,0}^{tr} & ; & & W_{11,0} &= W_{63,0}^{tr} \\
W_{14,0} &= W_{22,0}^{tr} & ; & & W_{16,0} &= W_{24,0}^{tr} & ; & & W_{17,0} &= W_{43,0}^{tr} & ; & & W_{18,0} &= W_{52,0}^{tr} & ; & & W_{19,0} &= W_{54,0}^{tr} \\
W_{20,0} &= W_{63,0}^{tr} & ; & & W_{26,0} &= W_{44,0}^{tr} & ; & & W_{27,0} &= W_{53,0}^{tr} & ; & & W_{28,0} &= W_{55,0}^{tr} & ; & & W_{29,0} &= W_{65,0}^{tr} \\
W_{32,0} &= W_{34,0}^{tr} & ; & & W_{37,0} &= W_{45,0}^{tr} & ; & & W_{38,0} &= W_{66,0}^{tr} & ; & & W_{40,0} &= W_{46,0}^{tr} & ; & & W_{41,0} &= W_{67,0}^{tr} \\
W_{48,0} &= W_{56,0}^{tr} & ; & & W_{49,0} &= W_{61,0}^{tr} & ; & & W_{50,0} &= W_{68,0}^{tr} & ; & & W_{59,0} &= W_{69,0}^{tr} & ; & & W_{62,0} &= W_{70,0}^{tr}
\end{aligned}$$

L'opérateur  $C$  est définie par la matrice  $C_{x,y} = 1$  si  $W_{x,0} = W_{y,0}^{tr}$  et zéro sinon.  $C$  est l'opérateur envoyant un vertex de l'algèbre chirale droite (gauche) dans son conjugué par rapport à la chiralité de l'algèbre chirale gauche (droite).

### Le graphe d'Ocneau et l'algèbre de symétries quantiques.

La dimension de l'algèbre des symétries quantiques est  $d_O = 72$ . La solution de l'équation (2.10) pour la paire d'index  $(i, j)$  fixés à  $(1, 0)$  ou  $(0, 1)$ <sup>4</sup> donne les deux matrices d'adjacence (droite et gauche) du graphe d'Ocneau  $V_{10}$  et  $V_{01}$ . En choisissant un ordre adéquat des matrices  $W_{z,0}$ , la forme explicite de la matrice  $V_{10}$  est

<sup>4</sup>En utilisant l'étiquetage habituel pour les graphes  $SU(3)$  ceci correspond à :  
 $(ij) = (1, 0) \rightarrow (i_1, i_2) = (1, 0)$   $(j_1, j_2) = (0, 0)$  et  $(ij) = (0, 1) \rightarrow (i_1, i_2) = (0, 0)$ ,  $(j_1, j_2) = (1, 0)$

$$V_{10} = \begin{pmatrix} Ad(\mathcal{E}_5) & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & Ad(\mathcal{E}_5) & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & Ad(\mathcal{E}_5) & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & Ad(\mathcal{E}_5) & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & Ad(\mathcal{E}_5) & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & Ad(\mathcal{E}_5) \end{pmatrix} \quad (3.64)$$

où la matrice  $Ad(\mathcal{E}_5)$  est la matrice d'adjacence du graphe  $\mathcal{E}_5$

$$Ad(\mathcal{E}_5) = \begin{pmatrix} \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$$

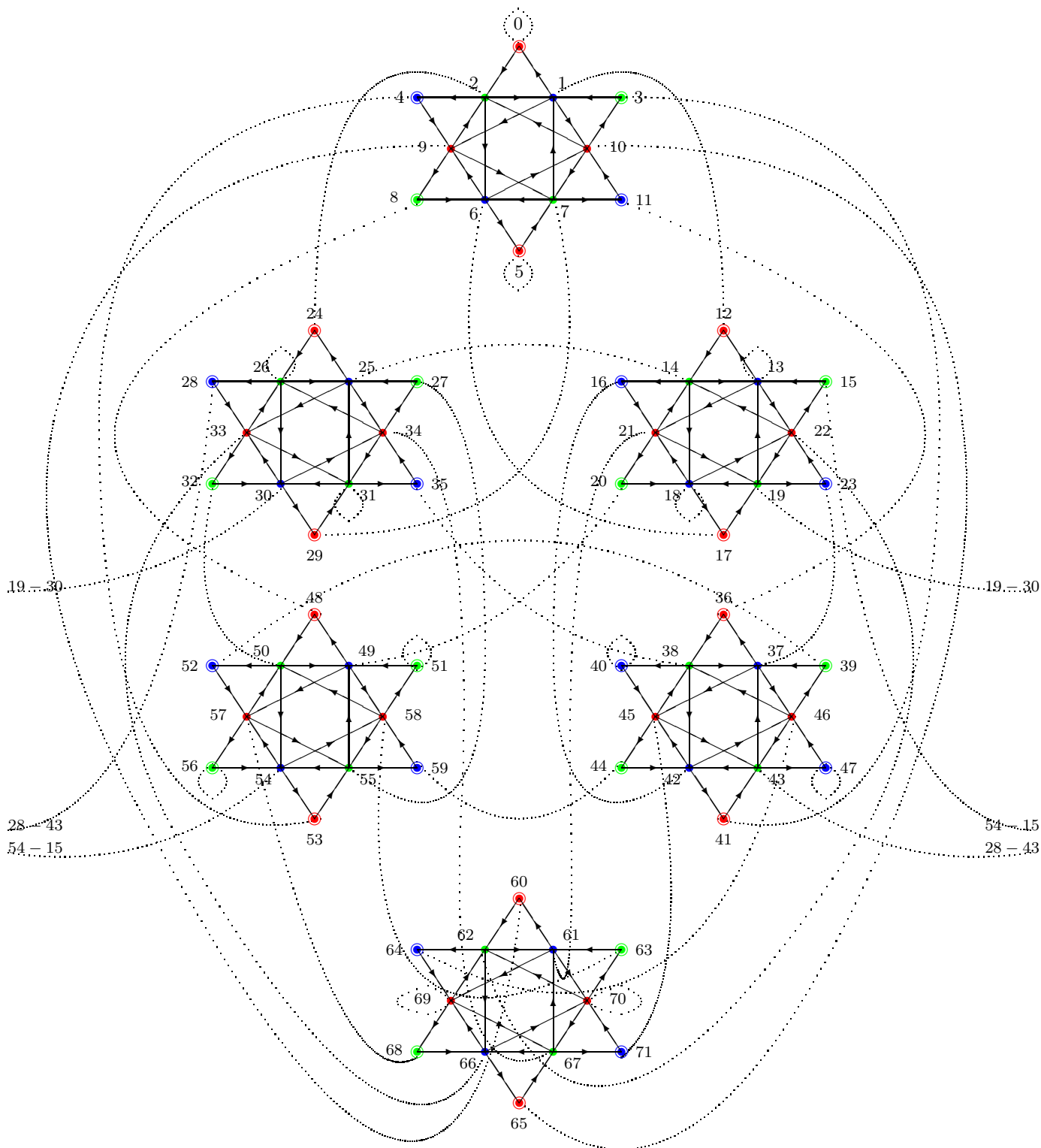


FIG. 3.16 – Le graphe d’Ocneanu associé au graphe non-simplement lacé  $Oc(\mathcal{FE}_5)$ .

tel-00393835, version 1 - 9 Jun 2009

Le générateur chirale droite peut s'écrire

$$V_{01} = C^{-1}V_{10}C$$

Dans la Figure 3.3 est présenté la partie chirale gauche du graphe des symétries quantiques, les lignes pointillés représentent l'action de l'opérateur chirale  $C$  sur les vertex du graphe. Dans l'ordre choisi, les matrices d'adjacence  $V_{10}$  et  $V_{01}$  correspondent aux générateurs droite et gauche de l'algèbre des symétries quantique

$$O_2 = V_{10} \text{ pour le générateur chirale gauche et}$$

$$O_{24} = V_{01} \text{ pour le générateur chirale droite .}$$

Les deux générateurs conjugués<sup>5</sup> sont :  $O_1 = V_{10}^{tr}$  et  $O_{12} = V_{01}^{tr}$

Dans la Figure 3.3 on reconnaît six sous-graphes de type  $\mathcal{E}_5$ . Le premier ( $0 \leq z \leq 11$ ) est une sous-algèbre de graphe de type  $\mathcal{E}_5$ . Les autres cinq sous graphes sont des modules de la sous algèbre  $\mathcal{E}_5$ . La partie chirale droite est le graphe de Cayley de la multiplication par le générateur  $O_{24}$ , l'action de ce générateurs sur les vertex du graphes (donc le graphe chirale droite) peut être déterminée à travers l'action de l'opérateur chirale  $C$  comme

$$O_{24} \cdot O_x = C^{-1}O_x C$$

A l'aide de ce graphe d'Ocneanu, des générateurs  $V_{10}$  et  $V_{01}$  et des équations (2.17), (2.18), (2.19) on peut obtenir automatiquement l'ensemble des matrices  $V_{ij}$ , ou de façon équivalente les matrices toriques twistées  $W_{xy}$ , qui sont données par la relation  $(V_{ij})_{xy} = (W_{xy})_{ij}$ .

---

<sup>5</sup>Rappelons que la conjugaison dans les graphes  $SU(3)$  est donnée par  $(i_1 i_2)^* = (i_2, i_1)$ , et que les générateurs conjugués sont les matrices d'adjacence du graphe avec les flèches renversées.

# Conclusion

Le travail présenté dans cette thèse est centré sur le développement d'une technique de résolution de l'équation de scission modulaire. La solution de cette équation nous permet de calculer de manière relativement simple les symétries quantiques d'un invariant modulaire, c'est à dire : l'ensemble des matrices toriques, le graphe d'Ocneanu et une réalisation matricielle de l'algèbre des symétries quantiques  $Oc(G)$ . Dans la plupart des cas nous pouvons aussi déterminer l'algèbre  $Oc(G)$  et le graphe de Coxeter  $G$  associé. La méthode est telle que nous ne avons pas besoin de construire explicitement le groupoïde quantique  $\mathcal{B}$ , les résultats de cette recherche permettent d'obtenir, de manière indirecte, des informations utiles sur cette structure du groupoïde quantique  $\mathcal{B}$ .

Dans ce travail nous avons présenté de manière détaillée la méthode de scission modulaire, en remarquant particulièrement les différences existantes entre le cas commutative et le cas non commutative, ainsi que les particularités des cas du système  $SU(2)$  et du système  $SU(3)$ . Nous avons montré explicitement la solution du problème pour une série d'exemples, parmi ces exemples nous trouvons, bien sûr, certains cas déjà connus que on servi principalement pour illustrer la technique, mais nous avons aussi traité explicitement des cas dont la résolution n'était pas disponible dans la littérature jusqu'à maintenant (même si les résultats finals étaient connus). Parmi ces derniers exemples nous remarquons en particulier les problèmes  $\mathcal{E}_5$ ,  $\mathcal{E}_5/3$  et  $\mathcal{E}_9$  du système  $SU(3)$ , pour ce dernier cas nous avons montré de une part que il est associé à une algèbre de symétries quantiques non commutative, ce qui mène à la solution la plus complexe du problème de scission modulaire, et en deuxième lieu que cet invariant modulaire est associé à deux graphes  $\mathcal{E}_9$  et  $\mathcal{E}_9/3$ . Avec la méthode de scission modulaire nous n'avons pas retrouvé le troisième graphe qui avait été éliminé par d'A. Ocneanu. Ceci est une évidence de que les résultats sont en accord avec la structure de groupoïde quantique que nous avons décrit brièvement dans le premier chapitre.

Nous avons aussi exploré le cadre plus général des graphes non simplement lacés. Dans ce cas la méthode de scission modulaire nous a permis d'examiner les cas  $F_4$ ,  $B_3$ ,  $B_4$ , et  $G_2$  du système  $SU(2)$ . Dans la famille  $SU(3)$ , nous avons examiné le graphe non simplement lacé  $\mathcal{F}_5$  qui est un  $Z_3$  quotient de l'exceptionnel simplement lacé  $\mathcal{E}_5$  de même niveau. Dans tous les

cas, l'espace vectoriel du graphe considéré est lui-même un module sur l'algèbre de fusion de même niveau, qui est une algèbre de type  $A$  (résultat connu, tout au moins pour la série  $SU(2)$ ). Par contre, ce module, qui est un  $Z_+$ -module, n'est pas "rigide", en ce sens que ses constantes de structure ne vérifient pas la propriété de symétrie usuelle  $(F_n)_{ab} = (F_{\bar{n}})_{ba}$ , la notation  $\bar{n}$  désignant le "dual" (conjugué) de  $n$  dans l'algèbre de fusion (pour  $SU(2)$ , on a  $\bar{n} = n$ ), ce qui est d'ailleurs bien évident puisque ces constantes sont déterminées par la matrice d'adjacence du graphe lui-même, qui, par hypothèse, n'est pas simplement lacé.

Dans les cas ordinaires (simplement lacés), on sait associer, à toute théorie conforme invariante modulaire, deux algèbres en dualité (plus précisément, un groupoïde quantique) dont les algèbres de caractères s'identifient à l'algèbre de fusion, d'une part, et à l'algèbre des symétries quantiques, d'autre part. Pour tous les cas non - simplement lacés examinés, nous avons déterminé la décomposition par blocs (il s'agit d'algèbres de dimension finie semi - simples) des deux algèbres qui, pour une situation simplement lacée, devraient avoir la même dimension totale, les deux espaces vectoriels sous jacents étant en dualité. Dans le cas non simplement lacé nous n'avons pas obtenu une structure aussi simple du fait des propriétés inhabituelles des modules, mais il s'avère que l'introduction de facteur correctifs très simples (essentiellement justifiés par l'existence d'une action de groupe finie sur le graphe correspondant) permet d'identifier les dimensions obtenues. Ce travail suggère donc l'existence d'une nouvelle structure algébrique, finalement assez "simple" lié au exemples non-simplement lacés.

L'exploration de cette structure formelle associé aux graphes non-simplement lacés constitue une direction de travail à développer dans le futur. L'étude de la structure algébrique (type groupoïde quantique) associé aux cas non simplement lacés de plus bas niveau, ( $B_3$ ,  $B_4$  ou  $G_3$ ), paraît être un problème que nous pourrions aborder de manière empirique comme on l'a fait pour le cas  $A_1$  de  $SU(3)$ . Dans ce dernier, comme pour les exemples non simplement lacés, nous ne comptons pas avec une définition bien établie des cellules de différents types. Une définition "à la main" pourrait être proposée pour introduire un coproduit compatible avec la multiplication de l'espace des doubles triangles pour, ensuite, étudier les propriétés algébriques de l'objet résultant par dualité.

Autre direction de travail consiste en explorer, avec notre point de vue, les différentes applications à la physique théorique que ce formalisme pourrait avoir. Des travaux faisant mention à la structure de groupoïde quantique associé aux graphes ADE est déjà apparue dans plusieurs travaux (en particulier [67], [29], [69]). Mais nous n'avons pas cherché à aller plus loin dans cette direction, réservant ce travail pour une recherche ultérieure.

# Bibliographie

- [1] G. Aldon, J. M. Mény, L. Xavier, *Introduction à la théorie des graphes*. CRDP Académie de Lyon, 2005.
- [2] H. Bacry, *Lectures on group theory and particle theory*, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1977.
- [3] R. E. Behrend, P. A. Pearce, V. Petkova, J.-B. Zuber, *On the classification of Bulk and Boundary Conformal Field Theories*, Phys. Lett. **B444** (1998) 163–166.
- [4] R. E. Behrend, P. A. Pearce, V. Petkova, J.-B. Zuber, *Boundary Conditions in Rational Conformal Field Theories*, Nucl. Phys. **B579** (2000) 707–773.
- [5] V. Mac Lane, G. Birkhoff, *Algebra*. The Macmillan Company, 1967.
- [6] Bockenhauer, Jens and Evans, David E., *Modular invariants, graphs and alpha-induction for nets of subfactors. I*, Commun. Math. Phys. , **197** (1998) 361-386, hep-th/9801171.
- [7] Bockenhauer, Jens and Evans, David E., *Modular invariants, graphs and alpha-induction for nets of subfactors. II*, Commun. Math. Phys. , **200** (1999) 57-103, hep-th/9805023.
- [8] Bockenhauer, Jens and Evans, David E., *Modular invariants, graphs and alpha-induction for nets of subfactors. III*, Commun. Math. Phys. , **205** (1999) 183-228, hep-th/9812110.
- [9] J. Böckenhauer, D. E. Evans, *Modular invariants, graphs and  $\alpha$ -induction for nets of subfactors I*, Commun. Math. Phys. **197** (1998) 361–386 ; *II*, Commun. Math. Phys. **200** (1999) 57–103 ; *III*, Commun. Math. Phys. **205** (1999) 183–200.
- [10] J. Böckenhauer, D. E. Evans, Y. Kawahigashi, *On  $\alpha$ -induction, chiral generators and modular invariants for subfactors*, Commun. Math. Phys. **208** (1999) 429–487.
- [11] Bockenhauer, Jens and Evans, David E., *On alpha induction, chiral generators and modular invariants for subfactors*, Commun. Math. Phys. , **208** (1999) 429-487, math.oe/9904109.
- [12] Bockenhauer, Jens and Evans, David E. and Kawahigashi, Yasuyuki, *Chiral structure of modular invariants for subfactors*, Commun. Math. Phys. , **210** (2000) 733-784, math.oe/9907149.
- [13] G. Böhm, K. Szlachányi, *A coassociative  $C^*$  quantum group with non-integral dimensions*, Lett. Math. Phys. **38** (1996) 437–456.

- [14] G. Böhm, F. Nill, K. Szlachányi, *Weak Hopf Algebras I. Integral theory and  $C^*$  structure*, J. Algebra **221** (1999) 385–438.
- [15] A. Cappelli, C. Itzykson, J.-B. Zuber, *Modular invariant partition functions in two dimensions*, Nucl. Phys. **B280** (1987) 445–465.
- [16] A. Cappelli, C. Itzykson and J. B. Zuber, *The ADE classification of minimal and  $A_1^{(1)}$  conformal invariant theories*, Comm. Math. Phys. **13** (1987) 1.
- [17] R. Coquereaux, *Classical and quantum polyhedra : A fusion graph algebra point of view*, Lectures given at the Karpacz Winter School 2001, AIP Conf. Proc. **589** (2001) 181–203.
- [18] R. Coquereaux, *Notes on the quantum tetrahedron*, hep-th/0011006, Moscow Math. J. vol2, n1, Jan.-March, (2002) 1-40,
- [19] R. Coquereaux, *The  $A_2$  Ocneanu quantum groupoid*, hep-th/0311151, Contemporary Mathematics, **376** (2005).
- [20] R. Coquereaux, *Racah-Wigner quantum 6j Symbols, Ocneanu Cells for  $A_N$  diagrams and quantum grupoids*, hep-th/0511293, (2006).
- [21] R. Coquereaux, A. O. Garcia, R. Trincherro, *Hopf stars, twisted Hopf stars and scalar products on quantum spaces*, J. Geom. Phys., **36** (2000) 25–59 , math-ph/9904037.
- [22] R. Coquereaux, A. O. Garcia, *On bialgebras associated with paths and essential paths on ADE graphs*, Int.J.Geom.Meth.Mod.Phys. **2** (2005) 441-466, math-ph/0411048.
- [23] R. Coquereaux, D. Hammaoui, G. Schieber, E.H. Tahri *Comments about quantum symmetries of  $SU(3)$  graphs*, math-ph/0508002.
- [24] R. Coquereaux, M. Huerta *Torus structure on graphs and twisted partition functions for minimal and affine models*, J. of Geom. and Phys., **48**, **4** (2003) 580-634, hep-th/0301215.
- [25] R. Coquereaux, E. Isasi, *On quantum symmetries on the non-ADE graph  $F_4$* , Adv. Theor. Math. Phys. , **8**, (2005), 955-985, hep-th/0409201.
- [26] R. Coquereaux, G. Schieber, *Twisted partition functions for ADE boundary conformal field theories and Ocneanu algebras of quantum symmetries*, hep-th/0107001, J. of Geom. and Phys. **781** (2002) 1-43.
- [27] R. Coquereaux, G. Schieber, *Determination of quantum symmetries for higher ADE systems from the modular  $T$  matrix*, J.Math.Phys. **44** (2003) 3809-3837, hep-th/0203242.
- [28] R. Coquereaux, R. Trincherro, *On Quantum symmetries of ADE graphs*, Advances in Theor. and Math. Phys. , **8**, **1**, (2004) , hep-th/0401140.
- [29] C. H. Chui, C. Mercat, W. Orrick and P. A. Pearce, *Integrable Lattice Realizations of Conformal Twisted Boundary Conditions*, Phys.Lett. B517 (2001) 429-435, hep-th/0106182.
- [30] C. H. Chui, C. Mercat, P. A. Pearce, *Integrable and conformal twisted boundary conditions for  $sl(2)$  A-D-E lattice models*, J. Phys., A36, (2003) 2623-2662, hep-th/0210301.

- [31] P. Di Francesco, P. Matthieu, D. Senechal, *Conformal Field Theory*, Springer, 1997.
- [32] F. Di Francesco, J.-B. Zuber, *SU(N) Lattice integrable models associated with graphs*, Nucl. Phys **B338**, (1990), 602-646.
- [33] P. Di Francesco, J.-B. Zuber, *SU(N) Lattice integrable models associated with graphs*, Nucl. Phys **B338** (1990) 602–646 ; *SU(N) Lattice Integrable Models and Modular Invariance*, Recents Developments in Conformal Field Theories, Trieste Conference (1989), S. Randjbar-Daemi, E. Sezgin, J.-B. Zuber eds., World Scientific (1990).
- [34] P. Di Francesco, J.-B. Zuber, *In Recent Developments in Conformal Field Theories*, Trieste Conference 1989, S. Randjbar-Daemi, E Sezgin and J.-B. Zuber eds, World Scientific 1990 ;  
P. Di Francesco, Int. J. Mod. Phys. A7 (1992) 407-500.
- [35] R. Dijkgraaf, E. Verlinde, *Modular invariance and the fusion algebra*, Nucl. Phys. (Proc. Suppl.) **5B** (1998) 87–97.
- [36] B. Dubrovin, *Differential geometry of the space of orbits of a Coxeter group*, hep-th/9303152, SISSA-29/93/FM.
- [37] P. Etingof, M. Kovanof, *Representations of tensor categories and Dynkin diagrams*, nt.Math.Res.Not. , **5** (1995) 235-247, hep-th/9408078.
- [38] D. E. Evans, *Critical Phenomena, modular invariants and operator algebras*, (2002), math.oa/0204281.
- [39] D. E. Evans, Y. Kawahigashi, *Quantum symmetries on operator algebras*, Clarendon Press, Oxford, 1998.
- [40] D. E. Evans, P. R. Pinto, *Subfactor realisation of modular invariants*, Commun. Math. Phys. , **237** (2003) 309-363, math.oa/0309174.
- [41] D. E. Evans, P. R. Pinto, *Modular invariance and the fusion algebra*, (2003), math.oa/0309175.
- [42] J. Fuchs, *Affine Lie algebras and quantum groups*, Cambridge, 1992.
- [43] T. Gannon, *The Classification of affine su(3) modular invariants*, Comm. Math. Phys. 161, 233-263 (1994).
- [44] T. Gannon, *Modular data : the algebraic combinatorics of conformal field theory*, math.QA/0103044.
- [45] F. M. Goodman, F. R. Vaughan Jones ; Pierre De La, *Coxeter Graphs and Towers of Algebras* , Springer-Verlag New York, (1989).
- [46] A. Hurwitz, *Über endliche Gruppen, welche in der Theory der elliptischen Transzendenten auβtraten* ; Math. Annalen **27** (1886) 183-233.
- [47] E. Isasi, Gil Schieber *From modular invariants to graphs : the modular splitting method*, math-ph/0609064.

- [48] C. Itzykson, J.-B. Zuber, *Two-dimensional conformal invariant theories on a torus*, Nucl. Phys. **B275** (1986) 580–616.
- [49] A. Kirillov, V. Ostrik, *On a  $q$ -analog of the McKay correspondence and the ADE classification of  $\hat{sl}_2$  conformal field theories*, (2001), math.QA/0101219.
- [50] F. Martin, E. Royer, *Formes modulaires pour la transcendance*, Université Blaise Pascal and Université Paul Valéry.
- [51] J. McKay, *Graphs, singularities, and finite groups*, In *The Santa Cruz Conference on Finite Groups (Univ. California, Santa Cruz, Calif., 1979)*, volume 37 of *Proc. Sympos. Pure Math.*, pages 183–186. Amer. Math. Soc., Providence, R.I., 1980.
- [52] G. Moore, N. Seiberg, *Naturality in conformal field theory*, Nucl. Phys. **B313** (1989) 16–40.
- [53] G. Moore, N. Seiberg, *Classical and quantum conformal field theory*, Commun. Math. Phys. **123** (1989) 177–254.
- [54] A. Ocneanu, private communication.
- [55] A. Ocneanu, *Quantized groups, string algebras and Galois theory for algebras*, Operator algebras and Appl., Vol. 2, London Math. Soc. Lecture Notes Ser., **136**, Cambridge Univ. Press (1988) 119–172.
- [56] A. Ocneanu, (Lecture Notes written by Y. Kawahigashi), *Quantum Symmetry, Differential Geometry of Finite Graphs and Classification of Subfactors*, Univ. of Tokyo Seminar Notes (1990).
- [57] A. Ocneanu, *Paths on Coxeter diagrams : from Platonic solids and singularities to minimal models and subfactors*, notes taken by S. Goto, Fields Institute Monographs (Rajarama Bhat et al eds, AMS, 1999). Same title : talks given at the Centre de Physique Théorique, Luminy, Marseille, 1995.
- [58] A. Ocneanu, *Higher Coxeter systems*, Talk given at MSRI, <http://www.msri.org/publications/ln/msri/2000/subfactors/ocneanu>.
- [59] A. Ocneanu, *The Classification of subgroups of quantum  $SU(N)$* , Lectures at Bariloche Summer School, Argentina, Jan.2000, AMS Contemporary Mathematics 294, R. Coquereaux, A. García and R. Trinchero eds.
- [60] V. Ostrik, *Module categories, weak Hopf algebras and modular invariants*, Transformation Groups, **8, 2**, (2003) 177206, math.QA/0111139.
- [61] V. Pasquier, *Two-dimensional critical systems labelled by Dynkin diagrams*, Nucl.Phys. **B285** (1987) 162–172.
- [62] V. Pasquier, *Operator content of the ADE lattice models*, J. Phys. **A 20** (1987) 5707–5717.
- [63] V.B. Petkova, J.B. Zuber, *Generalized twisted partition functions*, hep-th/0011021, Phys. Lett. B504 (2001) 157-164. e-Print Archive : hep-th/0011021

- [64] V.B. Petkova and J.-B. Zuber, *The many faces of Ocneanu cells*, hep-th/0101151, Nucl. Phys. **B 603** (2001) 449.
- [65] P. Roche, *Ocneanu cell calculus and integrable lattice models*, Commun. Math. Phys. **127** (1990) 395–424.
- [66] G. Schieber, *L’algèbre des symétries quantiques d’Ocneanu et la classification des systèmes conformes à 2D*, PhD thesis (available in French and in Portuguese), UP (Marseille) and UFRJ (Rio de Janeiro). Sept. 2003.
- [67] N. Sousa, A. N. Schellekens, *Orientation matters for NIMreps*, Nucl. Phys. **B653** (2003) 339-368, hep-th/0210014.
- [68] G. S. Stewart. *Introduction to matrix computations*. Academic Press, 1973.
- [69] R. Trinchero, *Symmetries of faces models and the double triangle algebra*, (2005), hep-th/0501140 .
- [70] M. Toshiyune. *Modular Forms*. Springer, 1992.
- [71] E. Verlinde, *Fusion rules and modular transformations in 2-D Conformal Field Theory*, Nucl. Phys. B300,360-376,(1988).
- [72] J. B. Zuber, *Generalized Dynkin diagrams and root systems and their folding*, Presented at YITP International Workshop on Recent Developments in QCD and Hadron Physics, Kyoto, Japan, 16-18 Dec 1996. Published in Kyoto 1996, *Topological field theory, primitive forms and related topics* 453-493, hep-th/9707046
- [73] J. B. Zuber, *Graphs and reflection groups*, Commun.Math.Phys., **179** 265-294, (1996), hep-th/9507057
- [74] J.-B. Zuber, *On Dubrovin topological field theories*, hep-th/9312209, Mod. Phys. Lett. A9 (1994)749-760.
- [75] J.-B. Zuber, *CFT, BCFT, ADE and all that*, Lectures at Bariloche Summer School, Argentina, Jan. 2000, AMS Contemp. Math. **294**, R. Coquereaux, A. García and R. Trinchero eds.