

Les arbres couvrants d'un graphe d'influence

Spanning trees in an influence graph

Didier Lebert¹

¹ Unité d'Economie Appliquée, ENSTA Paris, i3-CRG Ecole Polytechnique - CNRS (UMR 9217), Institut Polytechnique de Paris, France, didier.lebert@ensta-paris.fr

RÉSUMÉ. Un graphe d'influence est la représentation d'une structure de flux dans la théorie de la dominance économique. Nous adaptons la notion d'arbre couvrant à poids maximal au contexte des graphes d'influence, pour des nœuds d'impulsion uniques. Nous expérimentons cet outil sur les flux commerciaux internationaux pour l'étalonner. Nous concluons que l'arbre sélectionné synthétise correctement les principales relations de dépendance de la structure en dépit de sa très faible contribution à la dépendance totale. Nous discutons finalement de l'adaptation de l'outil à l'analyse des flux technologiques.

ABSTRACT. An influence graph is the representation of a flow structure in the economic dominance theory. We adapt the notion of a maximum spanning tree to the context of influence graphs for a single impulse node. We experiment on international trade flows with this tool in order to calibrate it. We conclude that the selected tree correctly synthesizes the main dependency relationships of the structure despite its very small contribution to the total dependency. Finally, we discuss the adaptation of the tool to the analysis of technological flows.

MOTS-CLÉS. Théorie de la dominance économique, graphe d'influence, arbre couvrant à poids maximal, commerce international.

KEYWORDS. economic dominance theory, influence graph, maximum spanning tree, international trade.

1. Introduction

Un graphe d'influence est la représentation d'une structure de flux (de produits, monétaires, d'informations, de connaissances) dans la théorie de la dominance économique (TDE). Ce graphe n'a pas qu'un rôle de visualisation de cette structure, loin de là. Mieux encore : il ne représente pas *directement* la structure. Il rapporte en effet les éléments de la matrice de Leontief ou de Ghosh qui lui est associée. [LAN 74] montre que l'étude d'un graphe d'influence contribue à augmenter la portée analytique de ces matrices usuellement manipulées par l'analyse *input-output* [MIL 85].

[LAN 74] montre également que les éléments constitutifs du graphe d'influence (nœuds, liens entre ces nœuds) sont les briques qui servent à la mesure du déterminant des matrices citées plus haut. Ce déterminant matriciel nous informe donc de manière synthétique sur la topologie de la structure des relations entre les nœuds du graphe. Au final, la structure est plus ou moins (inter-)dépendante selon la valeur du déterminant. Imaginons que nous ayons affaire à une structure non réflexive (il n'existe pas de flux connectant un nœud directement à lui-même), alors la valeur du déterminant de la matrice de Leontief / Ghosh de la structure des flux est comprise entre 0 et 1, elle est d'autant plus proche de 0 que la structure est *interdépendante* (indiquant de nombreuses circularités, de nombreux feedbacks, d'importants effets d'amplification), et d'autant plus proche de 1 que la structure est *dépendante* (très arborescente, hiérarchique).

Jusqu'à aujourd'hui, c'est autour de la notion d'interdépendance que la TDE a construit son outillage analytique. Il s'est agi d'explorer la « partie droite » du déterminant (celle qui sépare sa valeur de 1) pour la décomposer selon la nature des flux qui s'adressent aux nœuds dans la structure. Par exemple, supprimons l'ensemble des flux aboutissant et partant d'un nœud, toutes autres choses égales, et l'on obtient un indice de *centralité* de ce nœud : avec quelle intensité les flux se recomposent-ils en l'absence de ce nœud ? Cela correspond à une analyse de robustesse du graphe à chacun de ses nœuds, à la manière de [FRI 91]. Ne gardons que les nœuds avec lesquels celui-ci est directement connecté, en entrée et / ou en sortie, et l'on obtient des mesures de l'*insertion* de ce nœud

dans la structure globale [LEB 15]. De nombreux raffinements à la TDE ont été proposés ces dernières années qui ont tous pour particularité de se centrer sur cette « partie droite » [LEB 17].

L'objectif de notre article est d'inverser le point de vue, en nous intéressant à la « partie gauche » de la valeur du déterminant d'une structure non réflexive. C'est alors la *dépendance* qui devient le point d'entrée. La dépendance d'une structure correspond au poids relatif des arborescences qui la composent. Un graphe dense comprenant de nombreux nœuds intègre une multitude d'arbres. Nous souhaitons en isoler seulement quelques-uns qui synthétisent l'essentiel des relations de dominance au sein la structure. Les arbres auxquels nous nous intéressons sont des « arbres couvrants de poids maximal » : dans un graphe comprenant n nœuds, ils les connectent tous en $n - 1$ arcs pondérés de sorte à maximiser le produit de la valeur de ces arcs. Les arcs sont également dirigés, faisant que le degré *entrant* pour chaque nœud (le nombre d'arcs qui aboutissent à ce nœud) en dehors du nœud d'impulsion (la « souche » de l'arbre) est strictement égal à 1, son degré *sortant* (le nombre d'arcs partant de ce nœud) pouvant être quelconque (mais inférieur ou égal à $n - 1$, donc).

Cette recherche des arbres de dominance peut s'effectuer sur toutes natures de flux que la TDE a pris l'habitude de représenter et analyser : relations interindustrielles, flux de commerce international, flux de communication, transferts de connaissances scientifiques et techniques (pour une synthèse, voir [LEB 17]). Nous allons l'appliquer ici à une base de données d'échanges internationaux de biens et services fournie par le CEPII : BACI¹. Depuis [WAS 94], les données d'échanges commerciaux internationaux servent souvent d'étalon à l'élaboration de nouveaux outils d'analyse structurale ([KIM 02], [SER 03], [MAH 06], [KAL 07], [BAR 10], [FAG 10], [DEB 11], [DEB 13], [CEP 17]). Nous nous situons ici dans cette tradition.

Dans la section 2, la décomposition d'une structure d'échanges en dépendance et interdépendance et le rapport aux arborescences sont précisés. Dans la section 3, les données de flux de commerce international sont présentées (BACI), l'algorithme d'identification des arbres couvrants à poids maximal est détaillé et les résultats obtenus sur la période 1995-2017 sont étudiés.

2. Les graphes d'influence

Les graphes d'influence, outils de la théorie de la dominance économique, approchent les structures relationnelles *dirigées* (i.e. asymétriques), *pondérées* (i.e. les flux entre les nœuds de la structure peuvent être d'intensités variables) et éventuellement *multiplexes* (i.e. les graphes peuvent superposer des flux de natures différentes) et *réflexives* (les nœuds peuvent être en relation directe avec eux-mêmes) par des systèmes linéaires. Les propriétés de ces systèmes sont synthétisées par [LAN 13].

Considérons une structure de n nœuds dans laquelle les flux allant du nœud i au nœud j sont notés x_{ij} , avec $X_i - \sum_{j=1}^n x_{ij} = Y_i$, où X_i est la l'activité du $i^{\text{ème}}$ nœud et Y_i est la demande en provenance de l'extérieur de la structure à ce nœud, et $X_j - \sum_{i=1}^n x_{ij} = W_j$, où W_j correspond au surplus du nœud j . Si a est la matrice carrée de format $n \times n$ dont les termes sont $a_{ij} = x_{ij}/X_j$ (« coefficients techniques »), nous obtenons une représentation matricielle du premier système sous la forme $AX = Y$, où $A = [I - a]$ (matrice de Leontief). Parallèlement, les termes $t_{ij} = x_{ij}/X_i$ sont appelés « coefficients de débouché ». Si t est la matrice de ces termes et T la matrice $[I - t]$ (matrice de Ghosh), nous avons une représentation du deuxième système sous la forme $X^R T = W^R$, où X^R est le vecteur ligne de X_j et W^R est le vecteur ligne de W_j . Les matrices A et T ont les mêmes coefficients diagonaux traduisant les « autoconsommations » des pôles : $\ell_i \equiv 1 - a_{ii} = 1 - t_{ii}$. La structure est réflexive s'il existe au moins un coefficient t_{ii} différent de 0.

Le graphe d'influence se définit alors de la manière suivante [LAN 13] :

¹ http://www.cepii.fr/CEPII/fr/bdd_modele/presentation.asp?id=37. Voir [GAU 10].

- chaque entité i de la structure d'échanges est représentée par un nœud dans le graphe ;
- à chaque flux x_{ij} allant des nœuds i à j est associé un arc entre ces nœuds. Tous les arcs sont dirigés dans le sens de l'influence dominante : soit *offre dominante*, soit *demande dominante* ;
- les arcs sont pondérés soit par les coefficients techniques a_{ij} , soit par les coefficients de débouché t_{ij} , et par les « boucles » ℓ_i ;
- à chaque nœud est associé un arc centrifuge ou centripète liant la structure à son extérieur. L'orientation de cet arc dépend du sens de la dominance, demande ou offre. La pondération de cet arc est donnée par $w_j \equiv W_j/X_j = 1 - \sum_{i=1}^n a_{ij} \geq 0$ lorsque les pondérations des arcs de la structure correspondent aux coefficients techniques a_{ij} . Cette pondération est donnée par $y_i \equiv Y_i/X_i = 1 - \sum_{j=1}^n t_{ij} \geq 0$ lorsque les pondérations des arcs de la structure correspondent aux coefficients de débouché t_{ij} .

Prenons un exemple de graphe d'influence d'une structure non réflexive de deux nœuds (figure 1). Ce sont les éléments d'une matrice de Ghosh qui y sont représentés (coefficients de débouché) dans une orientation « demande dominante » (le flux allant de i à j est orienté de j vers i . Si le premier correspond à un flux de biens, le deuxième correspond à sa contrepartie monétaire). La structure étant non réflexive, la diagonale principale de la matrice de Ghosh est composée de « 1 » (valeurs de ℓ_i).

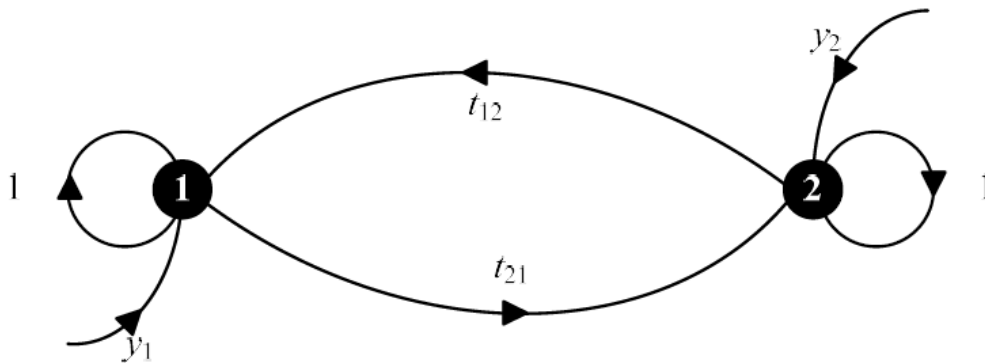


Figure 1. Graphe d'influence d'une structure non réflexive à deux nœuds

Lecture. Le graphe d'influence est constitué de 2 nœuds, « 1 » et « 2 ». La structure des échanges est dirigée (demande dominante), pondérés (coefficients de débouché), non réflexive (les nœuds n'échangent pas avec eux-mêmes, ce qui fait que la valeur de ℓ_i est égale à 1), et non multiplexe (les flux sont d'une seule nature).

Le graphe d'influence comporte davantage d'informations que la matrice de Ghosh à laquelle il s'associe. En effet, si la valeur des arcs centripètes y_i peut aisément se déduire du contenu de cette matrice, elle n'y apparaît pas directement.

[LAN 74] montre que la valeur D du déterminant d'une structure des échanges est un indicateur de la diffusion arborescente de l'influence à travers celle-ci. Nous avons noté plus haut qu'une « arborescence » est un graphe partiel (le graphe initial amputé d'arcs) incluant les relations avec l'extérieur, dans lequel les degrés entrants pour chaque nœud sont strictement égaux à 1, les degrés sortants pouvant être quelconques (arborescence intégrant une racine si nous introduisons un pôle supplémentaire où aboutissent l'ensemble des flux externes pondérés y_i ou w_j). La structure se comprend alors comme un agglomérat de hiérarchies – i.e. de *dépendances* – et la valeur du déterminant de cette structure est égale à la somme des valeurs de ces dépendances / arborescences. La valeur d'une arborescence est la valeur du produit des coefficients des arcs constituant l'arbre (figure 2).

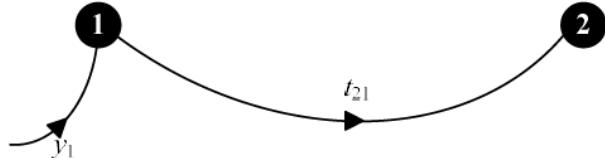
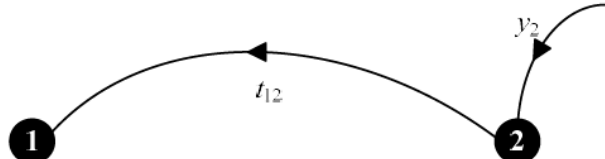

Arborescences	Valeurs des arborescences
	$A_1 = y_1 t_{21}$
	$A_2 = y_2 t_{12}$
	$A_3 = y_1 y_2$

Figure 2. Arborescences du graphe d'influence de la figure 1

On déduit de la figure 2 que $D \equiv A_1 + A_2 + A_3 = y_1 t_{21} + y_2 t_{12} + y_1 y_2$. Il est aisé de montrer que cette somme est égale à $1 - t_{12} t_{21}$, somme de la valeur signée des « graphes partiels hamiltoniens » qui constituent ce graphe, qui révèle son degré d'interdépendance. Au final, la valeur de D sépare deux composantes : la dépendance (poids relatif des arborescences) à sa gauche, et l'interdépendance (poids relatif des circularités) à sa droite (figure 3).

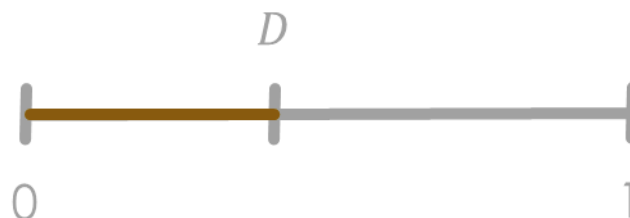


Figure 3. Décomposition de la structure en dépendance (D) et interdépendance ($1 - D$)

Nous nous intéressons ici à une catégorie d'arbres couvrants à poids maximal particuliers : ceux possédant un nœud d'impulsion unique. Ces arbres sont retenus car ils conduisent à des interprétations économiques d'une structure d'échanges : nous posons en effet que le nœud souche i est touché par un choc exogène (dont l'intensité dépend de la valeur de y_i) et que ce choc se répand dans la structure par les principaux canaux de dépendance (valeur des t_{ij}) qui lient les nœuds entre eux. Dans la figure 2, les deux premiers arbres appartiennent à cette catégorie. Ce sont des voisinages de dépendance entre nœuds qui apparaissent alors et qui forment l'arbre. Comme tout voisinage dans un graphe nous pouvons le délimiter par un « niveau ». Le niveau 1 indique les voisins directs d'un nœud (on peut distinguer les prédécesseurs et les successeurs de ce nœud puisque l'arbre est constitué d'arcs dirigés), le niveau 2 y ajoute les voisins directs de ces voisins, etc.

Il existe n arbres de ce type dans le graphe d'influence, autant que de nœuds d'impulsion. Il s'agit de déterminer celui ou ceux qui ont les valeurs les plus fortes, *i.e.* qui contribuent le plus à la valeur de D . Nous cherchons alors à savoir si ces quelques arbres parviennent à transmettre une image fidèle des relations de dépendance au sein d'une structure d'échange complexe.

2. Arbres de dominance dans le commerce international

Nous utilisons la base de données BACI éditée par le CEPII sur la période 1995-2017. Cette base recense annuellement les échanges commerciaux en valeur et en volume d'environ 220 économies pour environ 5 200 produits. Nous pourrions utiliser un « multigraphe » (un graphe multiplexe) pour représenter ces échanges, chaque produit possédant sa propre structure de flux. La TDE est apte à prendre en compte cette complexité. Cependant, nous utilisons ici les données de commerce international pour étalonner l'algorithme d'identification des arbres couvrants à poids maximal. Une agrégation de toutes ces natures de flux est de ce point de vue plus utile pour estimer la justesse de l'analyse sur longue période de l'évolution de ces arbres.

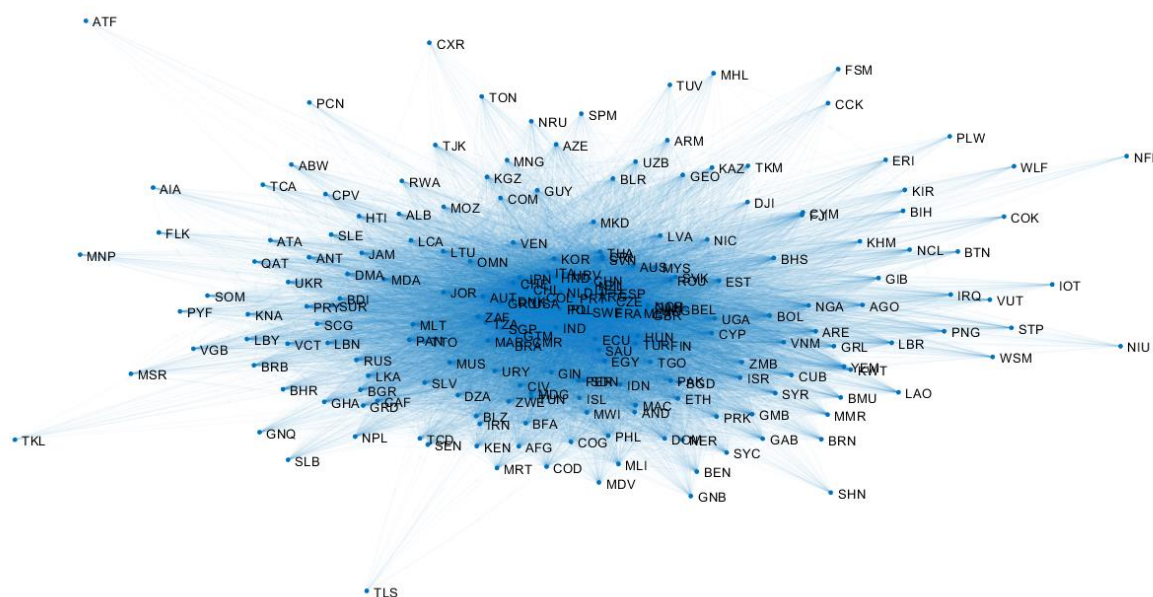


Figure 4. Structure du commerce international en 1995

Les figures 4 et 5 représentent les flux commerciaux entre les pays, qui constituent les nœuds des graphes, pour les années 1995 et 2017. Un lien entre pays est tracé lorsque, pour une année donnée, un échange entre 2 pays existe, qu'il aille dans un sens ou dans l'autre, et quelle que soit son intensité. Les nœuds / pays ne sont pas placés au hasard sur ces graphes. Plus le nombre de connexions d'un pays est élevé et leurs intensités fortes, plus ce pays se situe au centre du graphe. Les graphes ainsi obtenus révèlent des structures de type centre / périphérie : les pays membres du centre sont connectés avec l'essentiel des autres économies mondiales, alors que ceux de l'extrême périphérie, lorsqu'ils sont connectés, le sont essentiellement avec des pays du centre, très rarement entre eux.

C'est dans la revue *Social Forces* que l'on trouve, selon nous, la discussion aux enjeux économiques les plus importants sur l'évolution de la structure du commerce international de marchandises sur longue période. L'analyse structurale, dans les articles que nous allons citer, mobilise des outils très simples. Elle permet cependant d'aborder des questions de fond. Pour [KIM 02], l'évolution majeure ayant marqué le commerce mondial depuis le milieu des années 1960 est la densification des liaisons intra-régionales allant de pair avec celle des liaisons interrégionales. C'est cette double densification qu'ils nomment « globalisation des échanges ». La densité de la structure du commerce mondial est appréhendée par des indicateurs de *degré* des nœuds, c'est-à-dire par la densification de la matrice

centralité dite d'« intermédiarité » (qui révèle la capacité d'un nœud / pays à se situer au cœur des routes commerciales), nécessite cet effort de simplification pour être opérationnelle à grande échelle et de manière répétée. Et lorsqu'il s'agit de mesurer la centralité des pays dans un cadre dirigé, ils font le choix d'un indicateur beaucoup plus économe en ressources informatiques. Il existe donc une forme de pragmatisme dans le choix des métriques, pragmatisme qui se lève petit à petit avec le raffinement formel progressif (auquel participe la TDE) et l'usage de capacités de calcul additionnelles.

Le tableau de la dynamique du commerce international dressé par les travaux du LEM au final est assez ambivalent. En fonction des caractéristiques structurales retenues (graphes dirigés ou non, pondérés ou non), l'image d'une ouverture assez prononcée de nombreux pays périphériques au commerce international, ou celle d'un maintien, voire d'une accentuation, des effets polarisants excluant durablement un nombre important de ces pays d'une logique de rattrapage, se dessine. L'usage des outils les plus raffinés font cependant pencher de diagnostic des auteurs vers la deuxième image. En adoptant cette perspective, les caractéristiques du réseau du commerce international restent en définitive assez stables dans le temps. Autrement dit, la période récente laisse derrière elle peu d'indices d'un réel approfondissement des intégrations économiques internationales.

[SER 07] et [FRA 09] développent des analyses structurales du commerce international de marchandises en ne considérant que les déséquilibres commerciaux bilatéraux, conçus comme des sources potentielles d'instabilité du système économique international. Lorsqu'un flux va de A vers B et un autre de B vers A, ces auteurs quantifient la relation entre ces deux pays par la valeur de l'excédent commercial de l'un sur l'autre. C'est en s'inspirant de cette approche que nous proposons notre analyse des relations de dépendance, mais en maintenant les principes de la TDE. Ceux-ci nous disent que la relation bilatérale ne résume pas les rapports entre pays, et que les « chemins » plus long dans le graphe peuvent jouer un rôle important. A la suite de [KAL 07], prenons un exemple avec trois pays, A, B et C. Supposons d'abord que A entretient des liens commerciaux avec B et C, ces derniers n'échangeant pas entre eux. Supposons encore que les liens commerciaux traduisent des relations de crédit provenant d'un commerce d'intrants. En d'autres termes, supposons que les entreprises en A demandent des biens intermédiaires en provenance des entreprises en B et C, et qu'elles ont payé pour cela une fraction seulement du prix à titre d'acompte. Il se pourrait aussi que, dans le même temps, des entreprises en A fournissent des *inputs* à des entreprises en B et C dans des conditions de paiement similaires. Ce type de relations de crédit commercial est courant dans les échanges internationaux de marchandises. Dans cette situation donc, si un choc exogène touche le pays A, les entreprises en A peuvent être forcées au défaut de paiement envers leurs fournisseurs en B et C. Ces effets de transmission du choc initial sur B et C peuvent faire boomerang sur A, en proportion des commandes que lui adressent ces pays. Supposons maintenant que B et C soient également partenaires commerciaux : le choc touchant A sera transmis à C (et B) de manière directe, et indirectement en fonction de ses répercussions sur B (et C). Ces « effets de second ordre », pour reprendre la terminologie de ces auteurs, affecteront A à son tour, selon une logique de cascades d'interdépendances qui viendront amplifier la densité et la durée du choc initial en A. Les dépendances ne se résument donc pas aux déséquilibres bilatéraux. Nous devons alors repartir d'une représentation complète des flux, et sélectionner des arcs qui révèlent les dépendances les plus fortes. La notion d'arborescence à nœud d'impulsion unique (ANIU) isole des configurations de dépendance en respectant les principes de la TDE.

Définissons une arborescence à nœud d'impulsion unique i au sein d'un graphe d'influence comme un arbre connectant tous les nœuds et qui comprend l'arc externe y_i (i étant le nœud souche) et aucun autre arc externe. Pour un pôle d'impulsion i quelconque, identifions une ANIU particulière associée à ce pôle en adoptant la procédure suivante :

1. Suppression des arcs de valeur t_{ik} partant de k et aboutissant à i (puisque i est déjà atteint, son degré entrant devant rester égal à 1) ;

2. Stockage des arcs de valeur t_{ji} partant de i et aboutissant à j ;
3. Sélection dans le stock de l'arc à la valeur t_{ji} la plus élevée. Suppression de cette valeur du stock ;
4. Remplacement de j par i et retour à l'étape 1, jusqu'à ce que l'arborescence entière soit identifiée. On obtient un arbre couvrant qui comprend le même nombre d'arcs que de nœuds (en comptant le lien externe). Il maximise les influences locales transmises entre les pôles ;
5. Il y a autant de ces ANIU particuliers qu'il existe de nœuds dans le graphe. Nous sélectionnons celui dont la valeur est la plus élevée (produit des valeurs des arcs qui le constituent. Cf. supra).

L'ANIU sélectionné est, parmi l'ensemble des ANIU identifiés, celui qui contribue le plus à la valeur D du déterminant de la matrice T et, en ce sens, il est celui qui porte la plus forte dépendance structurale. Nous avons reproduit dans les figures 6 et 7 les ANIU sélectionnés pour les années 1995 et 2017 à partir des données du CEPII, en précisant le nœud d'impulsion.

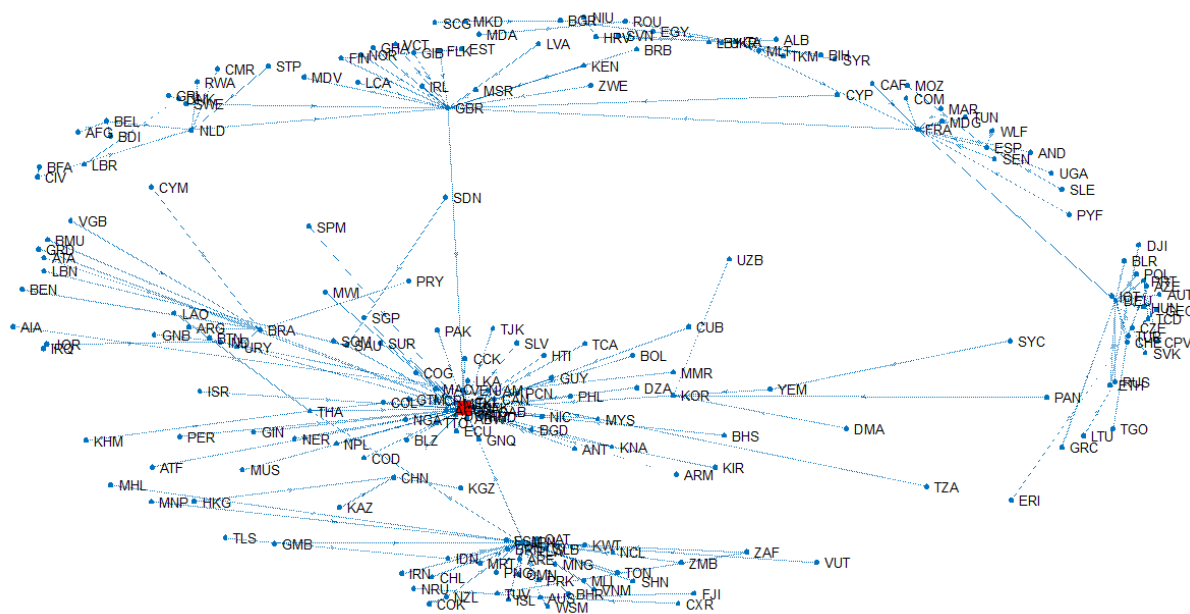


Figure 6. *Principal arbre couvrant à poids maximal en 1995*

La représentation des figures 6 et 7 apporte des éléments d'information additionnels, par la manière même dont nous l'avons conçue. Tout d'abord, plus les liens sont courts, plus l'intensité de la dépendance est élevée entre les pays. Ces figures contribuent donc à identifier des groupement d'économies fortement dépendantes d'une seule ou de quelques-unes. De ce point de vue, la période 1995-2017 voit l'émergence d'un nouveau *cluster* autour de la Chine, groupement qui apparaît plus dense que celui, historique, centré sur les Etats-Unis (qui, sur l'ensemble de la période, reste le nœud d'impulsion le plus important). Autre caractéristique de cette représentation : la longueur moyenne des liens correspond à la moyenne géométrique des coefficients des ANIU. La figure 8 montre que cette longueur moyenne a tendance à diminuer sur la période, alors que la dépendance est plutôt croissante dans le commerce international. Les ANIU aux valeurs les plus élevées contribuent ainsi de moins en moins à la dépendance globale de la structure.

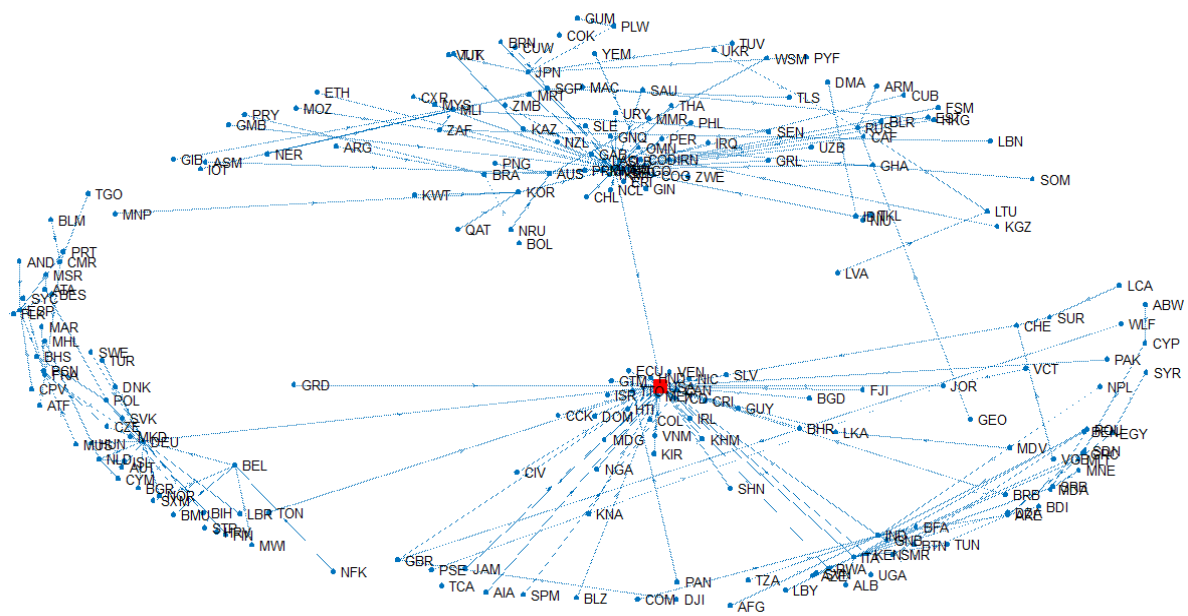


Figure 7. *Principal arbre couvrant à poids maximal en 2017*

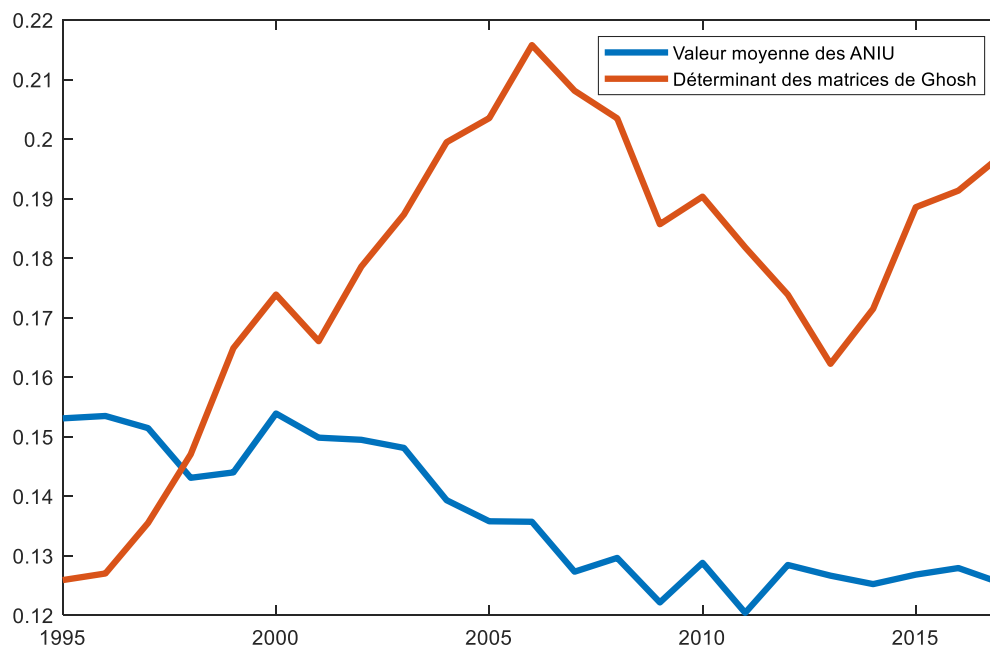


Figure 8. *Valeurs des déterminants matriciels et des ANIU sélectionnés*

Poids historique des Etats-Unis dans la structuration des flux commerciaux internationaux, rôle de plus en plus attracteur joué par l'économie chinoise, et nous pourrions ajouter à la lecture des figures 6 et 7 transformation des dépendances au sein des échanges commerciaux entre pays de l'Union Européenne, davantage germano-centrés notamment, voici quelques marqueurs essentiels de la mondialisation des dernières décennies en même temps que de sa rupture à la suite de la crise économique et financière de 2008-2009 [FOU 16].

Sur une structure d'échanges bien informée, ces ANIU possèdent en définitive un pouvoir de synthèse assez étonnant. Et pourtant ... Le poids global de la dépendance dans le commerce international (le déterminant de la matrice de Ghosh) varie entre 0,13 et 0,20, et la moyenne géométrique des dépendances au sein des ANIU aux valeurs maximales est proche de 0,14 (figure 8).

Cette dernière valeur doit être mise à la puissance 220 pour approcher la valeur réelle de l'arbre, composante de la dépendance totale ! Bref, ce pouvoir important de synthèse existe en dépit d'une contribution quasi nulle au phénomène global de la dépendance structurale. Encore un résultat étonnant de la théorie de la dominance économique.

4. Conclusion

Nous avons adapté la notion d'arbre couvrant au contexte de la théorie de la dominance économique et des graphes d'influence. Nous avons expérimenté cet outil aux flux commerciaux internationaux sur longue période pour l'étalonner. Nous concluons que l'arbre à nœud d'impulsion unique à valeur maximale synthétise correctement les principales relations de dépendance de la structure en dépit de sa très faible contribution à la dépendance totale.

Nous avons simplifié la structure des flux recensés dans BACI en agrégeant les valeurs des produits. Nous pouvons alors envisager un raffinement à la méthode en passant par les multigraphes non réflexifs qui représentent les échanges désagrégés : produire des ANIU par produits ou groupes de produits. Cette logique de désagrégation, c'est celle que l'on retrouve par défaut lorsque l'on s'intéresse aux flux technologiques. C'est une étape nécessaire pour conduire des études fines sur les relations de dépendance en matière d'innovation, que l'on choisisse de se centrer sur les processus de production des inventions (obtenues à partir de la combinaison de technologies anciennes) ou sur les transferts de connaissances entre territoires. Si l'on souhaite aboutir à un niveau d'analyse détaillé, en retenant les niveaux les plus désagrégés des nomenclatures technologiques et territoriales, il convient d'adapter la méthode des ANIU à la multiplication des arbres qui en résultera. En effet, s'il y a 220 nœuds dans les graphes étudiés dans cet article, il faudra passer à l'échelle au niveau territorial et technologique (environ 5 500 entrées dans NUTS3 ou TL3 pour les nomenclatures territoriales, environ 70 000 dans IPC pour la principale nomenclature technologique).

Bibliographie

- [BAR 10] BARIGOZZI M., FAGIOLO G., GARLASCHELLI D., « The multi-network of international trade: a commodity-specific analysis », *Physical Review E*, vol. 81(4), 046104, 2010.
- [CEP 17] CEPEDA F., GAMBOA F., LEON RINCON C., RINCON H., « The evolution of world trade from 1995 to 2014: a network approach », *CentER Discussion Papers*, n° 2017-008, 2017.
- [DEB 11] DE BENEDICTIS L., TAJOLI L., « The world trade network », *The World Economy*, vol. 34, p. 1417-1454, 2011.
- [DEB 13] DE BENEDICTIS L., NENCI S., SANTONI G., TAJOLI L., VICARELLI C., « Network analysis of world trade using the BACI-CEPII dataset », *Documents de Travail du CEPII*, n° 2013-24, 2013.
- [FAG 06] FAGIOLO G., « Directed or undirected? A new index to check for directionality of relations in socio-economic networks », *Economics Bulletin*, vol. 3, p. 1-12, 2006.
- [FAG 10] FAGIOLO G., REYES J., SCHIAVO S., « The evolution of the world trade web: a weighted-network analysis », *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 20, p. 479-514, 2010.
- [FOU 16] FOUQUIN M., HUGOT J., JEAN S., « Une brève histoire des mondialisations commerciales », in CEPII, *L'économie mondiale 2017*, Éditions La Découverte, collection Repères, Paris, 2016.
- [FRA 09] FRACASSO A., SCHIAVO S., « Global imbalances, exchange rates adjustment and the crisis: implications from network analysis », *Journal of Policy Modeling*, vol. 31, p. 601-619, 2009.
- [FRI 91] FRIEDKIN N.E., « Theoretical foundations for centrality measures », *American Journal of Sociology*, vol. 96, p. 1478-1504, 1991.
- [GAU 10] GAULIER G., ZIGNAGO S., « BACI: international trade database at the product-level – the 1994-2007 version », *Documents de Travail du CEPII*, n° 2010-23, 2010.
- [KAL 07] KALI R., REYES J., « The architecture of globalization: a network approach to international economic integration », *Journal of International Business Studies*, vol. 38, p. 595-620, 2007.

- [KIM 02] KIM S., SHIN E.-H., « A longitudinal analysis of globalization and regionalization in international trade: a social network approach », *Social Forces*, vol. 81, p. 445-468, 2002.
- [LAN 74] LANTNER R., *Théorie de la dominance économique*, Dunod, Paris, 1974.
- [LAN 13] LANTNER R., LEBERT D., « Dominance, dependence and interdependence in linear structures: a theoretical model and an application to the international trade flows », *Documents de travail du Centre d'Economie de la Sorbonne*, n° 13043, 2013.
- [LEB 15] LEBERT D., EL YOUNSI H., « Théorie de la dominance économique : indicateurs structuraux sur les relations interafricaines », *Economie Appliquée*, vol. 68(3), p.167-186, 2015.
- [LEB 17] LEBERT D., EL YOUNSI H., *Dynamiques des spécialisations internationales*, ISTE Press, Londres, 2017.
- [MAH 06] MAHUTGA M.C., « The persistence of structural inequality? A network analysis of international trade: 1965-2000 », *Social Forces*, vol. 84, p. 1863-1889, 2006.
- [MIL 85] MILLER R.E., BLAIR P.D., *Input-output analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs (NJ), 1985.
- [SER 03] SERRANO A., BOGUÑÁ M., « Topology of the world trade web », *Physical Review E*, vol. 68, 015101(R), 2003.
- [SER 07] SERRANO M.A., BOGUÑÁ M., VESPIGNANI A., « Patterns of dominant flows in the world trade web », *Journal of Economic Interaction and Coordination*, vol. 2, p. 111-124, 2007.
- [WAS 94] WASSERMAN S., FAUST K., *Social network analysis: methods and applications*, Cambridge University Press, Cambridge (Mass.), 1994.