

Rapport de Clôture — Théorie des Graphes

Propagation du Risque Systémique entre Protocoles d'Actifs Synthétiques DeFi

Derivalink R&D

6 août 2026

Résumé

Ce rapport clôt le volet de théorie des graphes consacré à l'étude de la propagation du risque systémique entre protocoles d'actifs synthétiques DeFi. Il couvre l'ensemble du travail réalisé : un pipeline de construction de graphe bâti à partir de données on-chain réelles (nœuds pour les protocoles, les actifs synthétiques, le collatéral, les oracles et les pools de DEX ; arêtes pondérées et variables dans le temps pour la collatéralisation, la fourniture d'oracle et l'hébergement en pool) ; des métriques de centralité, de détection de communautés et de propagation calculées sur ce graphe, dont une implémentation entièrement construite de DebtRank (Battiston et al., 2012) ; trois répliques historiques indépendantes qui calibrent le modèle contre des effondrements réels — DAI/mars 2023, UST/mai 2022 et Iron Finance/juin 2021 — en comparant un impact prédit *a priori* par le graphe à la perte réellement observée *a posteriori* ; et une dernière étape de généralisation multi-protocole qui résout une ambiguïté d'identité de nœud, construit un graphe unique couvrant 59 actifs suivis, et ajoute la réplique Iron Finance comme troisième test indépendant de la méthode.

Le résultat principal est cohérent sur les trois répliques historiques : le modèle est directionnellement correct dans chaque cas — il désigne toujours le bon nœud comme sérieusement à risque — mais sa précision varie systématiquement selon la structure du collatéral du protocole choqué. DAI (31 lignes de collatéral diversifiées) et Iron Finance (2 lignes, dont une algorithmique) sous-estiment toutes deux la perte réelle d'un facteur d'environ 2,7 à 4,7, malgré des structures très différentes ; UST (une seule ligne de collatéral non diversifiée) la surestime de 1,3×. L'instantané multi-protocole ajoute un constat structurel : le graphe on-chain réel reliant les 59 actifs suivis par ce projet est très majoritairement une forêt déconnectée d'étoiles par protocole, et non un système densément interconnecté — une réponse concrète, fondée sur les données, à la question de la part du risque systémique de la DeFi réellement visible à travers les seules arêtes de collatéral, d'oracle et de liquidité de pool on-chain.

Table des matières

1	Introduction et périmètre	2
1.1	Pourquoi la théorie des graphes	2
1.2	Ce que ce rapport affirme, et ce qu'il n'affirme pas	3
1.3	Structure de ce rapport	3
2	Construction du graphe	3
2.1	Nœuds et arêtes	3
2.2	Une lacune du schéma, non un défaut du code	4
2.3	Le problème d'identité de nœud	4
3	Centralité et détection de communautés	5
3.1	Deux projections de graphe différentes, pour deux questions différentes	5
3.2	Résultats sur le pilote DAI (10 mars 2023, veille du décrochage SVB / USDC)	5

4 Métriques de propagation et DebtRank	6
4.1 Une troisième projection de graphe, pour une raison plus stricte	6
4.2 DebtRank : implémentation et vérification	6
4.3 Une démonstration de pire cas sur le pilote DAI	7
5 Réplique historique I — DAI, mars 2023	7
5.1 Méthode	7
5.2 Le résultat réel	7
5.3 La prédiction calibrée	7
5.4 Lecture du résultat	8
6 Réplique historique II — UST, mai 2022	8
6.1 Pourquoi un nouveau développement était nécessaire, non un simple paramétrage	8
6.2 Le graphe <i>a priori</i> et le résultat réel	9
6.3 La prédiction calibrée, et pourquoi elle surestime	9
7 Réplique historique III — Iron Finance, juin 2021	10
7.1 Un troisième cas, structurellement distinct	10
7.2 Le graphe <i>a priori</i> et le résultat réel	10
7.3 Deux coupes calibrées, et pourquoi elles divergent	11
7.4 Pourquoi les deux coupes divergent autant : un constat méthodologique réel . . .	11
7.5 Comparaison entre les trois répliques	12
8 Généralisation multi-protocole	12
8.1 Construire un graphe unique sur tous les protocoles suivis	12
8.2 La fusion d'identité de nœud, validée sur données réelles	13
8.3 Une forêt majoritairement déconnectée	13
8.4 La centralité ne signifie pas la santé économique	13
9 Synthèse et conclusion	14
9.1 Les protocoles les plus centraux ont-ils davantage souffert ?	14
9.2 Ce que les trois répliques disent de la classe de modèle dans son ensemble	14
9.3 Ce qui reste ouvert	15
9.4 Bilan de clôture	15

1 Introduction et périmètre

1.1 Pourquoi la théorie des graphes

Chaque actif synthétique étudié par ailleurs dans ce projet s'inscrit dans un réseau de dépendances : il est adossé à du collatéral, valorisé par un ou plusieurs oracles, échangé sur des pools de DEX, et partage parfois un jeton avec un autre protocole. L'historique de prix d'un actif synthétique peut montrer qu'il a décroché de sa parité, mais ne peut, à lui seul, montrer *pourquoi le choc l'a atteint ni jusqu'où il aurait pu aller*. La spécification de recherche interne de ce projet — citée dans tout ce rapport uniquement par numéro de section, sous la forme §4.4, car le document lui-même est confidentiel — pose cette question comme un problème de graphe : construire explicitement le réseau de dépendances, mesurer quels nœuds sont structurellement centraux, et tester si cette centralité prédit une fragilité réelle.

Ce volet du projet, désigné en interne « S9 », construit et teste ce graphe. Il s'est déroulé en six étapes, reprenant les sous-sections de la spécification :

1. **Construction du graphe** (§4.4.1) : nœuds pour les protocoles, les actifs synthétiques, le collatéral, les oracles et les pools de DEX, construits à partir de tables on-chain réelles.

2. **Types d'arêtes** (§4.4.1) : arêtes pondérées et variables dans le temps pour la collatéralisation, la fourniture d'oracle, et l'hébergement en pool.
3. **Métriques de centralité** (§4.4.2) : degré, intermédiarité (*betweenness*), vecteur propre / PageRank, Katz, proximité (*closeness*).
4. **Détection de communautés** (§4.4.3) : Louvain, Leiden, partitionnement spectral.
5. **Métriques de propagation** (§4.4.4) : plus courts chemins, flot maximum, rayon spectral, et DebtRank.
6. **Réplique historique** (§4.4.5) : comparaison d'un impact prédit *a priori* par le graphe à un effondrement réel observé *a posteriori*, pour les deux événements nommément désignés (DAI/mars 2023, UST/mai 2022), puis étendue à un troisième (Iron Finance/juin 2021) et généralisée à un véritable graphe multi-protocole.

Les étapes 1 à 5 ont été délibérément construites et validées d'abord sur un seul protocole bien couvert (MakerDAO/DAI), suivant la même discipline « un seul actif pilote avant de généraliser » utilisée pour chaque chantier de modélisation précédent de ce projet (apprentissage automatique, apprentissage par renforcement, économétrie). L'étape 6 est celle où se trouve la substance réelle de ce rapport : trois tests historiques indépendants de l'ensemble du pipeline, plus une dernière étape qui fait passer le pilote mono-protocole à un véritable graphe multi-protocole.

1.2 Ce que ce rapport affirme, et ce qu'il n'affirme pas

Chaque chiffre de ce rapport est soit lu directement dans des données on-chain ou d'échange réelles, soit produit par un algorithme implémenté et testé unitairement dans le code de ce projet (64 tests pour le seul module de graphe au moment de la rédaction). Rien ici n'est une démonstration synthétique présentée comme un résultat réel. Lorsqu'un résultat est plus faible qu'espéré — et deux des trois répliques historiques sous-estiment l'effondrement réel d'un facteur trois à quatre — cela est rapporté sans détour, avec l'explication structurelle la plus plausible, plutôt que reformulé pour paraître plus concluant qu'il ne l'est. Cela reflète la discipline de restitution appliquée dans les autres rapports de clôture de ce projet.

1.3 Structure de ce rapport

La section 2 décrit la construction du graphe lui-même : ce qu'est un nœud, ce qu'est une arête, d'où viennent leurs poids, et une ambiguïté d'identité de nœud qu'il a fallu résoudre avant qu'un véritable graphe multi-protocole soit possible. La section 3 couvre les algorithmes de centralité, de détection de communautés et de propagation, y compris l'implémentation de DebtRank. Les sections 5 à 7 présentent les trois répliques historiques l'une après l'autre. La section 8 couvre proprement la généralisation multi-protocole : la correction d'identité de nœud mise en pratique, et un véritable instantané à 59 actifs de l'état courant. La section 9 conclut par une comparaison croisée des trois répliques, une réponse directe à la question posée par la spécification (§4.4.5) sur la question de savoir si les protocoles les plus centraux souffrent davantage, et un bilan honnête de ce qui reste ouvert.

2 Construction du graphe

2.1 Nœuds et arêtes

Le graphe comporte cinq types de nœuds, chacun ancré à une table réelle sur disque : protocoles (V_p), actifs synthétiques (V_a), collatéral (V_c), oracles (V_o) et pools de DEX (V_d). Un sixième type nommé par la spécification, les grappes d'arbitragistes (V_{arb}), n'a pas été construit : la table d'événements bruts qui serait nécessaire est définie dans le schéma mais ne comporte aucune partition peuplée nulle part dans ce projet — il n'y a donc rien sur disque à regrouper.

Trois des cinq types d'arêtes de la spécification disposent de données réelles sur disque et ont été implémentés :

- **Collatéralise** (E_{collat}) : issue d'une table de composition du collatéral, poids = valeur en dollars de la ligne de collatéral.
- **Fournit_oracle** (E_{oracle}) : issue d'une table de mises à jour d'oracle, poids = nombre de mises à jour sur une fenêtre glissante de 30 jours (un indicateur simplifié pour le couple « fréquence de mise à jour $\times$ volume » de la spécification).
- **Hébergé_en_pool** (E_{pool}) : issue d'une table d'état de pool DEX, poids = liquidité totale du pool en dollars.

Deux autres types, *synthétique-vers-arbitragiste* et *synthétique-compose-synthétique*, n'ont pas été construits pour la même raison que V_{arb} : aucun protocole de ce projet n'a de relation confirmée de type « synthétique adossé à un autre synthétique » sur disque, et la table des grappes d'arbitragistes n'a aucune donnée. Les deux sont documentés comme des lacunes de données, non masqués par une alternative inventée.

Chaque arête est un instantané à un instant donné, non une moyenne glissante : pour un horodatage d'instantané donné, chaque source d'arête retient la ligne la plus récente à cet horodatage ou avant, par clé, puis écarte entièrement cette clé si la ligne est plus ancienne qu'une fenêtre de péremption (90 jours par défaut). Ce choix explicite évite qu'une ligne de collatéral ou une source d'oracle ayant cessé de remonter des données des années avant la date d'instantané ne ressuscite silencieusement une arête fantôme.

2.2 Une lacune du schéma, non un défaut du code

L'énumération des types d'arêtes de la spécification ne prévoit aucune arête protocole-vers-actif. Les nœuds de protocole sont créés et catalogués correctement, mais rien ne pointe vers eux ni depuis eux dans ce schéma — une lacune réelle de la formalisation sous-jacente, documentée ici plutôt que masquée en inventant un sixième type d'arête en dehors du schéma convenu.

2.3 Le problème d'identité de nœud

Le même jeton du monde réel joue fréquemment deux rôles différents dans les données de ce projet. USDC, par exemple, est à la fois un actif suivi pour lui-même par ce projet (son propre historique d'oracle, sa propre analyse de décrochage) *et* une ligne de collatéral nommée adossant un autre protocole (le module PSM de MakerDAO). Naïvement, cela produit deux nœuds de graphe déconnectés pour le même actif réel : un sous son identité « actif », un sous son identité « collatéral », sans arête entre les deux.

Ce point avait été signalé comme une question ouverte dès la première construction du graphe de DAI, et délibérément laissé non résolu tant que le graphe ne couvrait qu'un seul protocole — avec un seul actif suivi dans le périmètre, la collision ne se présentait jamais. Elle est devenue incontournable dès qu'un véritable graphe multi-protocole a été tenté (section 8), et a été résolue ainsi : une ligne de collatéral dont l'identifiant figure *aussi* parmi les actifs suivis indépendamment dans l'instantané est raccordée au nœud existant de cet actif, au lieu de créer un second nœud isolé. Une ligne sans correspondance de ce type — le cas le plus courant, la majorité du collatéral (bitcoin enveloppé, divers jetons de gouvernance, coffres d'actifs du monde réel) n'étant jamais elle-même un V_a dans le périmètre de ce projet — n'est pas affectée, et reste un nœud autonome exactement comme avant. La correspondance est une comparaison de chaîne de caractères exacte sur l'identifiant d'actif, non une heuristique floue ou d'équivalence économique : deux déploiements on-chain différents « du même » jeton (par exemple de l'USDC ponté vers deux chaînes différentes) restent deux nœuds distincts tant que leurs identifiants ne sont pas littéralement identiques, par construction.

Confirmé directement sur données réelles avant d'écrire la correction : trois lignes de collatéral dans l'historique des 52 lignes de collatéral propres à MakerDAO sont aussi des actifs suivis

indépendamment ailleurs dans ce projet — USDC, USDT et ETH. Une quatrième collision, TITAN adossant l'IRON d'Iron Finance tout en étant aussi un actif suivi indépendamment via ses propres données de pool, est apparue naturellement en construisant la troisième réplique historique (section 7), et a constitué le premier exercice réel, de bout en bout, de la logique de fusion.

3 Centralité et détection de communautés

3.1 Deux projections de graphe différentes, pour deux questions différentes

Les poids d'arêtes de ce graphe sont des grandeurs économiques : valeur de collatéral en dollars, nombre de mises à jour d'oracle, liquidité en dollars. Les algorithmes de centralité qui posent la question « à quel point ce nœud est-il influent » (centralité de vecteur propre, PageRank) traitent un poids plus élevé comme davantage d'influence, directement. Les algorithmes qui posent la question « à quelle distance ce nœud est-il de cet autre » (intermédiarité, proximité) ont besoin d'une *distance* de type longueur de chemin, soit l'inverse d'une grandeur : une arête de collatéral de 1,95 milliard de dollars devrait se lire comme courte et significative, non comme longue et coûteuse. L'implémentation inverse le poids en distance ($\text{distance} = 1/\text{poids}$) pour les métriques fondées sur les chemins, et utilise le poids brut directement pour celles fondées sur l'influence, le tout appliqué sur un unique graphe dirigé où les arêtes parallèles (même source, même cible, type d'arête différent) sont sommées.

La détection de communautés pose un type de question différent — la cohésion, non la direction — et s'exécute sur une projection non dirigée distincte du même graphe. C'était un choix délibéré et vérifié : exécuter les mêmes algorithmes de communauté sur le graphe dirigé, où chaque arête pointe *vers* le nœud d'actif par construction, produit une réponse dégénérée où chaque nœud forme son propre singleton, faute de structure réciproque qu'un algorithme fondé sur la modularité puisse récompenser en regroupant. La projection non dirigée a été vérifiée sur un graphe de test synthétique à deux triangles, de structure de communauté connue, avant d'être considérée fiable sur données réelles, confirmant que les trois algorithmes (Louvain, Leiden, partitionnement spectral) séparent réellement une structure existante, et ne se contentent pas de réussir sur le seul cas réel trivial alors disponible.

3.2 Résultats sur le pilote DAI (10 mars 2023, veille du décrochage SVB / USDC)

Sur le graphe réel de DAI à 35 nœuds et 33 arêtes (31 arêtes de collatéralisation, 1 arête d'oracle, 1 arête de pool), le nœud d'actif domine chaque métrique d'influence — PageRank 0,46, centralité de Katz 1,0, contre une valeur quasi nulle pour chaque nœud feuille — et l'intermédiarité est exactement nulle partout. Une intermédiarité nulle est la réponse mathématiquement correcte pour une topologie en étoile purement dirigée, non un défaut : aucun nœud de collatéral feuille ne peut atteindre un autre nœud feuille sans une arête repartant *du* nœud d'actif, que ce schéma ne définit pas (section 2). L'échelle absolue de la proximité a été signalée comme sensible aux poids d'arête bruts en dollars alimentant la transformation en distance sans normalisation ; une normalisation logarithmique ou min-max des poids avant leur inversion en distances serait un raffinement naturel, non implémenté dans cette étape, pour éviter d'élargir le périmètre d'un calcul dont l'objectif premier était de valider le pipeline de bout en bout.

Louvain, Leiden et le partitionnement spectral s'accordent tous sur exactement deux communautés sur ce même graphe : l'étoile connectée à 34 nœuds (DAI plus chaque nœud de collatéral, d'oracle et de pool) et le nœud isolé `protocol:makerdao` — la réponse correcte et honnête pour un graphe mono-protocole, mais pas encore informative au regard du cadre de la spécification sur les « grappes de protocoles à risque corrélé », qui nécessite plus d'un protocole partageant une structure réelle pour produire un résultat non trivial. Ce test plus riche est repris en section 8.

4 Métriques de propagation et DebtRank

4.1 Une troisième projection de graphe, pour une raison plus stricte

Les plus courts chemins, le flot maximum, le rayon spectral et DebtRank posent tous la question de la propagation d'un choc ou d'une unité de valeur le long de dépendances économiques réelles, ce qui impose une exigence plus stricte que la centralité ou la détection de communautés : chaque poids d'arête comparé à un autre doit être dans la même unité. Les arêtes de collatéralisation et d'hébergement en pool sont toutes deux des grandeurs en dollars ; le poids d'une arête de fourniture d'oracle est un nombre de mises à jour sur une fenêtre glissante — une unité entièrement différente. Les mélanger dans une même métrique fausserait silencieusement chacun des quatre algorithmes de cette section, qui s'exécutent donc sur une troisième projection restreinte aux deux types d'arêtes libellées en dollars, conservée dirigée (contrairement à la projection de communauté), la propagation portant intrinsèquement sur la direction dans laquelle la valeur ou la détresse circule réellement.

Les plus courts chemins de Dijkstra et le flot maximum (l'implémentation push-relabel par défaut de la bibliothèque utilisée, l'un des deux algorithmes explicitement acceptés par la spécification) ne sont délibérément pas persistés : ils répondent à des questions par paire (« de cette ligne de collatéral à celle-là »), non à un fait par nœud et par instantané, et ont été démontrés sur des paires de nœuds réelles par sortie console directe plutôt qu'écrits sur disque. Sur la topologie en étoile pure du pilote DAI, les deux sont honnêtement dégénérés entre deux nœuds feuilles quelconques — inatteignable, flot nul — pour la même raison structurelle que l'intermédiarité est nulle (section 3) : aucune arête ne repart du nœud d'actif.

Le rayon spectral est exactement nul sur le graphe du pilote DAI, à la fois sur la sous-projection collatéral dirigée seule et sur la projection de valeur complète. C'est mathématiquement correct, non un échec de calcul : la matrice d'adjacence pondérée d'un graphe dirigé acyclique est nilpotente, donc chaque valeur propre est nulle par construction.

4.2 DebtRank : implémentation et vérification

DebtRank est la seule métrique de propagation qui reste réellement informative même sur une étoile mono-protocole, car elle est pondérée par la valeur plutôt que fondée sur l'existence d'un chemin. L'implémentation suit directement la formulation originale de Battiston et al. (2012) : une matrice d'impact normalisée $\text{impact}(i, j) = \text{poids}(i, j) / \text{poids_entrant_total}(j)$ — la fraction du financement économique de j qui dépend de i — et une propagation de détresse par rondes synchrones où chaque nœud propage son niveau de détresse courant exactement une fois, via une machine à états stricte non-détressé→actif→inactif. Cette règle de propagation unique garantit que l'algorithme se termine en au plus $|V|$ rondes même sur un graphe contenant des cycles, plutôt que de risquer une réverbération infinie qu'une approche naïve « itérer jusqu'à stabilisation » pourrait subir sur une entrée cyclique. La valeur économique d'un nœud — le terme de pondération dans le score DebtRank agrégé final — est approximée par le poids total des arêtes touchant le nœud (entrantes plus sortantes), une simplification documentée de la définition originale de Battiston fondée sur la taille du bilan comptable, pour laquelle les données de ce projet n'ont pas d'équivalent direct.

Avant d'être considérée fiable sur données réelles, l'implémentation a été vérifiée sur trois cas calculés à la main : une dépendance totale à deux nœuds (score attendu 0,5), une cascade en chaîne à trois nœuds (0,75 attendu), et un *cycle* à trois nœuds (0,6667 attendu) — ce dernier cas prouvant spécifiquement que la machine à états se termine correctement et ne compte pas deux fois un choc qui revient en boucle vers le nœud qui l'a déclenché.

4.3 Une démonstration de pire cas sur le pilote DAI

Avant toute réplique historique calibrée, DebtRank a été exercé comme démonstration de capacité en pire cas : choquer la plus grande ligne de collatéral réelle de DAI à l’époque (son module PSM-USDC, environ 1,95 milliard de dollars, la même ligne au cœur de la réplique de mars 2023 en section 5) à un effacement total de 100 % produit un score DebtRank de 0,173, ce qui signifie que DAI lui-même atteint 34,55 % de détresse. Choquer la plus petite ligne réelle sur le même graphe (une position Loopring LRC valant environ 1 214 \$) donne un score de manière appropriée quasi nul, $1,07 \times 10^{-7}$. Les deux chiffres sont proportionnels et vérifiés contre des valeurs de collatéral réelles, non des dispositifs synthétiques — cette démonstration est explicitement un contrôle de capacité en pire cas, non encore la prédiction *a priori* calibrée contre une magnitude de choc *réelle* que les répliques historiques des trois sections suivantes calculent.

5 Réplique historique I — DAI, mars 2023

5.1 Méthode

La spécification (§4.4.5) demande un test direct : construire le graphe à la veille d’un choc historique réel, propager un choc calibré sur ce qui s’est réellement produit (non un pire cas arbitraire), et comparer la prédiction du modèle au résultat réellement observé. L’instantané utilisé ici est daté du 10 mars 2023, veille du décrochage de l’USDC provoqué par la faillite de la Silicon Valley Bank — l’événement même que désigne la spécification, non une date choisie après coup pour correspondre au résultat. C’est le même graphe à 35 nœuds et 33 arêtes décrit en section 3.

5.2 Le résultat réel

Lu directement dans la table brute des mises à jour d’oracle, non dans un agrégat quotidien dérivé plus grossier (les tables dérivées de DAI de ce projet ne sont qu’à granularité quotidienne, trop grossière pour un événement qui a culminé et partiellement récupéré en quelques heures) :

Série	Creux	Écart	Horodatage (UTC)
USDC (oracle Chainlink)	0,8800	−1200 pb	11/03/2023 07 :51
DAI (oracle Chainlink)	0,8888	−1112 pb	11/03/2023 08 :10
DAI (pool Curve 3pool)	0,8283	−1717 pb	(marché secondaire, cité depuis une étude de cas déjà audité)

TABLE 1 – Creux réellement observés, DAI/USDC, mars 2023.

Le creux du marché secondaire (pool Curve) est nettement pire que le creux au niveau de l’oracle — le prix négocié de DAI s’est décroché davantage que ce que sa propre référence de prix n’a jamais montré, cohérent avec un retrait de liquidité et une panique amplifiant le choc au-delà de ce qu’une simple lecture d’oracle statique capture.

5.3 La prédiction calibrée

Le creux réel de l’oracle USDC (0,8800) implique une perte fractionnaire réelle de 12,00 %, appliquée comme niveau de détresse initial DebtRank sur la ligne de collatéral PSM-USDC de DAI — sa plus grande ligne à l’époque, à environ 1,95 milliard de dollars — puis propagée à travers la même sous-projection de valeur décrite en section 4. Résultat : DebtRank prédit que DAI atteint 4,15 % de détresse (équivalent à −415 pb).

	Prédit (DebtRank)	Observé
vs. creux oracle (−1112 pb)	−415 pb	37,3 % de l’observé
vs. creux pool Curve (−1717 pb)	−415 pb	24,1 % de l’observé

TABLE 2 – Détresse DAI prédite vs. réelle, mars 2023.

5.4 Lecture du résultat

Le modèle a la bonne *direction* : il identifie correctement que DAI subirait un stress réel et non négligeable d’un décrochage de l’USDC de cette ampleur, non rien du tout, et se situe dans le bon ordre de grandeur (des centaines de points de base, non un chiffre unique, non des milliers). Il sous-estime la magnitude réelle d’un facteur d’environ 2,7 à 4,1. Les raisons structurelles les plus plausibles, par ordre de poids probable : DebtRank est ici un modèle *statique* de partage de la valeur du collatéral, il ne propage donc que la fraction du financement de DAI que représente la seule ligne choquée, alors que l’événement réel de mars 2023 n’était pas un choc limité à l’USDC — d’autres collatéraux crypto ont bougé dans la même fenêtre de krach macro éclair, un stress corrélé qu’un modèle à une seule ligne ne peut structurellement pas voir. La panique de marché et le retrait de liquidité, que le creux du pool Curve, pire, laisse déjà entrevoir directement, amplifient l’impact réel sur les prix au-delà de ce qu’un modèle de comptabilité de collatéral reflète. Les mécanismes de rédemption instantanée du propre module PSM de DAI, documentés ailleurs dans ce projet comme la raison pour laquelle le décrochage a été supportable et de courte durée, sont un canal de récupération dynamique qu’un instantané statique à une seule ronde ne peut pas non plus modéliser.

Ceci est rapporté comme un constat honnête sur les limites de cette classe de modèle, non comme un échec du pipeline : un modèle de propagation simple, auditable et pondéré par la valeur signale correctement que DAI est à risque du fait de sa plus grande dépendance de collatéral, et se situe dans le bon ordre de grandeur, sans avoir besoin de modéliser la microstructure de marché ni les mécanismes de rédemption dynamiques — un outil de dépistage directionnel raisonnable, non un substitut précis à un test de résistance. La question de savoir si ce ratio de sous-estimation particulier est une propriété générale de cette classe de modèle ou propre à la structure de collatéral diversifiée de DAI est testée directement en section 7.

6 Réplique historique II — UST, mai 2022

6.1 Pourquoi un nouveau développement était nécessaire, non un simple paramétrage

La spécification (§4.4.5) désigne UST/mai 2022 comme sa seconde cible de réplique. La table de composition du collatéral utilisée par la réplique DAI n’a aucune ligne pour un quelconque actif Terra, UST ou Mirror — confirmé par un balayage complet de la table entière, non supposé. Ce n’est pas une lacune de couverture à combler : le mécanisme de parité de l’UST est algorithmique (de l’UST est brûlé pour émettre de l’UST et inversement, via le module de marché natif de Terra), non un collatéral verrouillé de type CDP, il n’était donc jamais destiné à s’insérer dans un schéma construit autour de soldes de collatéral par ligne.

Un nouveau chargeur de données synthétise une table de la même *forme* que la composition de collatéral, à partir du propre journal d’événements d’échange brut de Terra (LUNA brûlé via le chemin d’échange marché-vers-UST), afin que l’ensemble du pipeline de construction et de métriques existant s’exécute sans changement sur les données Terra — seul le chargeur diffère.

Cela introduit une véritable différence méthodologique par rapport à l'arête de DAI, divulguée plutôt que masquée : le poids de collatéral de DAI est un *solde* en dollars à un instant donné (combien est verrouillé maintenant) ; le mécanisme algorithmique de l'UST n'a pas de tel solde à lire, son poids d'arête est donc plutôt un *flux* — la valeur totale en dollars de LUNA brûlé sur la semaine précédant l'instantané, comme indicateur de la capacité de financement engagée. Cette distinction affecte l'interprétation mais non le ratio principal de cette réplique, puisque LUNA est la seule arête entrante modélisée de l'UST et que la normalisation de la matrice d'impact vaut exactement 1,0 quel que soit le montant précis utilisé pour le poids de l'arête.

Une contrainte opérationnelle réelle est apparue en construisant ce chargeur : la table d'événements Terra sous-jacente pèse environ 48 Go pour le seul actif UST, avec quatorze types d'événements distincts mélangés dans les mêmes fichiers partitionnés. Un premier balayage non délimité a épuisé la mémoire de la machine de travail ; la correction délimite chaque balayage aux sous-partitions mensuelles exactes que touche une fenêtre de dates donnée, en utilisant un moteur de requête en flux continu de bout en bout.

6.2 Le graphe *a priori* et le résultat réel

L'instantané est daté du 8 mai 2022, veille de la rupture aiguë, choisie en vérifiant jour par jour : l'UST est resté à moins de 50 pb de sa parité jusqu'au 6 mai 2022, a chuté à -137 pb le 7 mai, puis s'est effondré de 24,6 % en une seule journée le 9 mai. Le graphe qui en résulte comporte exactement trois nœuds et une arête — l'UST, son collatéral LUNA, et un nœud de protocole isolé — avec l'arête LUNA→UST pondérée à 482,7 M\$ (7 511 464 LUNA brûlés dans la semaine précédant l'instantané, au cours de clôture du LUNA lui-même le 8 mai 2022, 64,26 \$).

Série	Référence	Creux	Perte
LUNA (cours au comptant, échange)	64,26 \$	0,00004 \$	99,9999 %
UST (cours au comptant, échange)	1,00 \$ (parité)	0,2346 \$	76,54 %

TABLE 3 – Creux réellement observés, LUNA/UST, mai 2022.

6.3 La prédiction calibrée, et pourquoi elle surestime

LUNA n'a pas de parité à 1 \$ pour calibrer un choc, son propre cours de clôture d'avant-krach est donc utilisé comme référence à la place. L'effondrement réel de LUNA équivaut, pour DebtRank, à un choc quasi total de 1,0. Propagé à travers l'unique arête LUNA→UST — un ratio d'impact de exactement 1,0, puisque c'est la seule arête entrante modélisée de l'UST — DebtRank prédit que l'UST atteint 100,0 % de détresse, contre une perte réellement observée de 76,5 % : la prédiction représente 130,7 % de ce qui s'est réellement produit.

C'est le biais inverse de celui de la réplique DAI, pour une raison compréhensible. Le financement réel de DAI est diversifié sur 31 lignes de collatéral, si bien qu'un choc à une seule ligne est structurellement dilué par le modèle, alors même que le stress corrélé et multi-collatéral de l'événement réel a quand même dépassé la prédiction diluée — une sous-estimation. Le financement modélisé de l'UST repose sur un mécanisme unique, si bien qu'un effondrement quasi total de ce mécanisme unique se propage à pleine puissance, sans rien pour le diluer — alors que l'UST réel a conservé 23,5 centimes de valeur à son creux exact, grâce à des dynamiques qu'un modèle de propagation statique à une seule ronde ne peut pas voir : la tentative de déploiement de réserves en bitcoin de la Luna Foundation Guard, des plateformes d'échange suspendant ou ajustant les retraits, et le simple fait qu'une « spirale de la mort », même là, se déroule sur plusieurs jours et non instantanément.

Lue conjointement à la réplique DAI, les deux résultats font le même constat par des chemins opposés : une propagation DebtRank statique à une seule ronde est un outil de dépistage directionnel raisonnable — les deux répliques signalent correctement que la dépendance en aval du nœud choqué est sérieusement à risque, dans le bon ordre de grandeur — mais ce n'est pas un substitut précis à un test de résistance, car les marchés réels ont des dynamiques (amplification par la panique pour un système diversifié, amortissement partiel pour un système peu diversifié) qu'un modèle linéaire à un seul coup ne peut capturer dans aucune des deux directions.

7 Réplique historique III — Iron Finance, juin 2021

7.1 Un troisième cas, structurellement distinct

La spécification ne désigne nommément que deux cibles de réplique ; ce projet en a ajouté une troisième, délibérément choisie pour se situer structurellement entre les deux autres. L'IRON d'Iron Finance était un stablecoin à collatéral *partiel*, adossé à un mélange de collatéral matériel exogène (USDC) et d'un jeton de part émis par le protocole lui-même de façon endogène (TITAN), dans des proportions gouvernées par un ratio de collatéralisation mobile — ni le modèle intégralement collatéralisé de DAI, ni celui de l'UST, sans collatéral, purement algorithmique. Ce projet disposait déjà d'une reconstruction médico-légale complète et auditée indépendamment de l'effondrement d'Iron Finance en juin 2021, contre laquelle calibrer et comparer les résultats — cette réplique n'a donc nécessité aucune nouvelle acquisition de données, seulement une nouvelle synthèse d'arêtes de graphe.

La table de composition du collatéral n'a pas non plus de ligne pour Iron Finance, pour une raison distincte de celle de l'UST : le financement à collatéral partiel y est un unique partage global à deux voies (pourcentage du ratio de collatéralisation multiplié par l'offre totale), non détaillé par ligne comme les cinquante-deux positions de collatéral de DAI. Un nouveau chargeur synthétise une table à deux lignes, de la même forme que la composition de collatéral, à partir de l'état de ratio de collatéralisation on-chain propre à Iron Finance : une ligne pour la part matérielle en USDC, une pour la part algorithmique résiduelle en TITAN — reconstruisant, de manière indépendante, un ratio de collatéralisation de 75,12 %, à 0,02 point de pourcentage du 75,15 % enregistré directement on-chain au même horodatage.

Cette réplique est aussi le premier véritable exercice de bout en bout de la fusion d'identité de nœud décrite en section 2 : TITAN adosse l'IRON *et* est suivi indépendamment via ses propres données de liquidité de pool, si bien que les deux rôles se résolvent en un unique nœud porteur d'un véritable sens économique, laissant l'effondrement de prix réel de TITAN se propager vers l'IRON par une simple arête de graphe plutôt que par un lien narratif affirmé en dehors du modèle.

7.2 Le graphe *a priori* et le résultat réel

L'instantané est daté du 15 juin 2021, veille de la panique bancaire (TITAN a culminé le lendemain matin). Le graphe qui en résulte comporte 18 nœuds et 16 arêtes : les deux lignes de collatéral (USDC 562,8 M\$, TITAN 186,4 M\$, totalisant environ 749,2 M\$, cohérent avec la valeur totale de l'offre d'IRON à l'instantané), plus quatorze arêtes de liquidité de pool issues des pools de DEX propres à IRON et à TITAN, dont deux importantes (environ 679,7 M\$ et 680,7 M\$, toutes deux vers IRON) et douze faibles ou quasi nulles.

L'IRON présente deux résultats réels distincts qui méritent d'être rapportés côte à côte, sur le même modèle que la dualité oracle/pool de DAI : un bref creux de panique intrajournalier, et un niveau stabilisé une fois les rédemptions gelées et le prix ayant retrouvé son véritable plancher adossé au collatéral.

Série	Référence	Résultat	Perte
TITAN	57,77 \$ (avant-krach)	0,000008 \$	99,99999 %
IRON, creux intrajournalier	1,00 \$ (parité)	0,5857 \$	41,4 %
IRON, niveau stabilisé	1,00 \$ (parité)	≈0,76 \$	24,0 %

TABLE 4 – Creux réellement observés, TITAN/IRON, juin 2021, cités depuis une étude de cas déjà audité.

7.3 Deux coupes calibrées, et pourquoi elles divergent

L'effondrement réel de TITAN équivaut, pour DebtRank, à un choc total de 1,0. Propagé à travers la sous-projection de valeur en utilisant la même convention que les répliques DAI et UST (arêtes de collatéral *et* de liquidité de pool ensemble), DebtRank prédit que l'IRON n'atteint que 8,8 % de détresse. Une seconde coupe, limitée au collatéral seul — excluant les deux grandes arêtes de liquidité de pool — prédit 24,9 % à la place.

Sous-projection de valeur	Prédit	vs. intrajournalier (41,4 %)	vs. stabilisé (24,0 %)
Collatéral + liquidité de pool (cohérent DAI/UST)	8,8 %	21,3 % de l'observé	36,8 % de l'observé
Collatéral seul	24,9 %	60,0 % de l'observé	103,6 % de l'observé

TABLE 5 – Détresse IRON prédite vs. réelle, deux coupes de sous-projection.

La coupe limitée au collatéral seul est, à quatre points de pourcentage près, une correspondance quasi exacte avec la perte réelle stabilisée de l'IRON — le résultat le plus proche des trois répliques de ce rapport. Ce n'est pas une coïncidence : la part de la ligne algorithmique dans le financement total (186,4 M\$ / 749,2 M\$ ≈ 24,9 %) est, par construction, proche de la part algorithmique impliquée par le ratio de collatéralisation lui-même (100 % – 75,15 % ≈ 24,85 %), et le fait que l'IRON se soit stabilisé près de son ratio de collatéralisation effectif est exactement le mécanisme que le rapport médico-légal source décrit de manière indépendante. DebtRank reconstruit le même fait qu'une analyse complètement différente, au niveau des blocs, avait établi séparément.

7.4 Pourquoi les deux coupes divergent autant : un constat méthodologique réel

La convention de sous-projection de valeur utilisée sans changement dans les trois répliques regroupe les arêtes de collatéralisation et d'hébergement en pool dans une seule projection en grandeur dollar, car les deux sont libellées en dollars et, sur le graphe de DAI, l'unique arête du pool Curve était faible par rapport au collatéral sur 31 lignes, si bien que la distinction importait peu. Iron Finance rompt franchement cette hypothèse : la liquidité combinée de ses deux pools de DEX (1,36 milliard de dollars) est presque le double de son collatéral total (749 M\$). La liquidité de pool est une mesure de profondeur d'échange — combien peut bouger sans glissement de prix — ce qui est économiquement différent du financement par collatéral — ce qui est réellement mis en gage contre la parité — et la convention de sous-projection de valeur, non modifiée,

dilue silencieusement le choc entre les deux alors qu'elle ne le devrait pas, pour un protocole dont la liquidité de pool se trouve rivaliser avec son collatéral. Ce point était invisible avec un ou deux protocoles dans le périmètre ; il n'est apparu qu'une fois qu'un troisième protocole, structurellement différent, a traversé le même pipeline non modifié — ce qui est précisément l'objet d'une étape de généralisation : un résultat d'avoir poussé la méthode plus loin, non un défaut découvert trop tard pour compter.

La convention existante est laissée inchangée dans le module de propagation lui-même, puisqu'elle reste correcte pour DAI et l'UST et que cette ambiguïté devrait être résolue de manière générique, non corrigée au cas par cas pour un seul protocole ; la coupe limitée au collatéral est ici calculée comme une analyse ponctuelle documentée et réutilisable, rapportée aux côtés du résultat principal, non substituée silencieusement à celui-ci.

7.5 Comparaison entre les trois répliques

En utilisant la même convention partout (arêtes de collatéral et de liquidité de pool ensemble), le ratio de sous-estimation d'Iron Finance se situe presque dans la même fourchette que celui de DAI, malgré une structure de collatéral totalement différente — deux lignes, dont une algorithmique, contre trente et une lignes diversifiées :

Réplique	Structure	Prédit / observé	Biais
DAI, mars 2023	31 lignes diversifiées	24,1–37,3 %	Sous-estimation 2,7–4,1×
UST, mai 2022	1 arête non diversifiée	130,7 %	Surestimation 1,3×
Iron Finance, juin 2021	2 lignes + 2 grands pools	21,3–36,8 %	Sous-estimation 2,7–4,7×

TABLE 6 – Comparaison entre répliques, convention principale de sous-projection de valeur.

Ceci suggère, avec seulement trois points de données, que la sous-estimation d'un facteur trois à quatre observée deux fois est moins un effet propre à la diversification qu'une propriété générale de la propagation DebtRank statique à une seule ronde face à un effondrement réel, sur plusieurs heures ou plusieurs jours — ni l'amplification dynamique par la panique, ni un choc corrélé sur plusieurs canaux à la fois ne sont quelque chose qu'un modèle linéaire à un seul coup peut voir par construction, quel que soit le degré de diversification du financement du système choqué.

8 Généralisation multi-protocole

8.1 Construire un graphe unique sur tous les protocoles suivis

Chaque section précédente travaille sur le graphe propre à un seul protocole, construit en nommant explicitement ses actifs. Une généralisation véritable exigeait de découvrir l'univers complet des actifs suivis directement depuis le disque — l'union de tous les identifiants d'actif apparaissant comme clé primaire de l'une des trois tables sources d'arêtes (composition du collatéral, mises à jour d'oracle, état de pool) — plutôt que de continuer à coder en dur une liste par protocole. Cette découverte trouve 59 actifs suivis distincts : MakerDAO/DAI, GMX/GLP, dix synthétiques d'actions Synthetix, Ethena, Resolv, Circle/USDC, Tether/USDT, Lido/stETH,

onze synthétiques Mirror Protocol, deux variantes d’UST ponté, Iron Finance, FRAX, et plusieurs flux de prix de référence couvrant plusieurs chaînes.

Charger l’historique complet et pluriannuel de cinquante-neuf actifs de manière non délimitée risquait d’épuiser la mémoire de la machine de travail — le seul historique de liquidité de pool d’Iron Finance approche les six millions de lignes. Comme la logique de sélection sous-jacente n’a jamais besoin que de données situées dans une fenêtre de péremption bornée autour de la date d’instantané choisie, chaque chargement a été délimité à cette fenêtre avant matérialisation, ce qui est sans perte pour le résultat final : tout ce qui se trouve hors de la fenêtre aurait de toute façon été écarté par le filtre de péremption, à un coût mémoire plus élevé.

La date d’instantané elle-même est déterminée par les données plutôt que choisie à la main : l’horodatage maximum global sur les trois tables sources d’arêtes, si bien que « actuel » signifie « aussi récent que les données le permettent réellement », non une date pratique choisie pour produire un résultat plus flatteur. Le graphe qui en résulte comporte 110 nœuds et 39 arêtes (4 de collatéralisation, 16 d’hébergement en pool, 19 de fourniture d’oracle).

8.2 La fusion d’identité de nœud, validée sur données réelles

La correction décrite en section 2 se déclenche correctement sur ce graphe multi-protocole réel et hétérogène : un nœud de prix de référence pour l’ETH apparaît comme un unique nœud portant à la fois une arête entrante de fourniture d’oracle (son propre suivi de prix indépendant) *et* une arête sortante de collatéralisation vers DAI — un véritable pont inter-protocole, confirmé directement plutôt que supposé. La centralité, la détection de communautés et la propagation ont toutes tourné sur ce graphe *sans aucun* changement de code aux algorithmes eux-mêmes, la contrepartie recherchée en construisant dès le départ un pipeline agnostique du protocole plutôt qu’une implémentation propre à chaque protocole.

8.3 Une forêt majoritairement déconnectée

Louvain, Leiden et le partitionnement spectral s’accordent tous sur 93 communautés pour 110 nœuds — le graphe multi-protocole réel est très majoritairement un ensemble de singletons et de paires, non un réseau densément connecté. Exactement deux grappes de taille significative existent : une grappe à six nœuds autour de DAI (DAI lui-même, l’ETH, le stETH enveloppé, une position de collatéral d’actif du monde réel, et un pool de DEX) et une grappe à neuf nœuds autour de l’UST ponté (deux variantes d’UST enveloppé plus sept pools de DEX résiduels). Chaque autre protocole suivi — Iron Finance, FRAX, les onze synthétiques Mirror, les dix synthétiques d’actions Synthetix, Ethena, Resolv, GLP — est sa propre étoile totalement isolée, ne partageant aucune arête on-chain réelle avec aucun autre protocole de ce jeu de données.

C’est un constat réel, fondé sur les données, non un artefact d’un graphe incomplet : les arêtes de collatéralisation, de fourniture d’oracle et d’hébergement en pool on-chain, telles que les données de ce projet les enregistrent réellement, ne relient pour la plupart pas un protocole d’actif synthétique à un autre. Là où le risque systémique réel se propage effectivement au-delà des frontières de protocole — par des détenteurs communs, un sentiment de marché corrélé, ou des défaillances d’infrastructure partagée plutôt qu’une dépendance on-chain directe — ce schéma de graphe, construit strictement à partir des types d’arêtes définis par la spécification, ne peut structurellement pas le voir.

8.4 La centralité ne signifie pas la santé économique

Une illustration concrète est apparue directement dans cet instantané : l’UST ponté est à égalité avec DAI pour le plus haut degré entrant de tout le graphe (six arêtes entrantes chacun), alors que la parité Terra est morte depuis mai 2022 (section 6). La raison est banale et révélatrice : sept pools de DEX différents continuent de signaler une liquidité fraîche pour le jeton enveloppé,

des années après l’effondrement de l’actif sous-jacent. Mesurée ainsi, la centralité de graphe reflète « combien de plateformes cotent encore cet actif », ce qui n’est pas la même question que « cet actif est-il économiquement sain » — une mise en garde contre le fait de lire la centralité structurelle seule comme un signal de sécurité, et un argument concret pour l’associer au type de réplique historique *a posteriori* que fournissent les trois sections centrales de ce rapport.

Séparément, le collatéral actuellement frais de DAI s’est consolidé à seulement quatre lignes à cette date d’instantané, contre trente et une à la date de la réplique de mars 2023 — cohérent, sans le démontrer de manière concluante, avec la restructuration réelle qu’a connue le collatéral de MakerDAO au fil des années suivantes. Que ceci reflète pleinement une consolidation on-chain réelle ou, en partie, une fenêtre de couverture de données plus étroite pour quelques lignes spécifiques n’est pas tranché ici, et est signalé comme une question ouverte plutôt qu’affirmé dans un sens ou dans l’autre.

9 Synthèse et conclusion

9.1 Les protocoles les plus centraux ont-ils davantage souffert ?

La spécification (§4.4.5) pose directement cette question, et ce rapport peut désormais y répondre avec trois tests historiques indépendants plutôt qu’un seul. **Directionnellement, oui, au sein du graphe propre à chaque protocole** : dans chacune des trois répliques, le nœud que DebtRank identifie comme central au système choqué est exactement le nœud qui, en réalité, a subi une détresse réelle, sérieuse et mesurable — DAI, l’UST et l’IRON se sont chacun décrochés de leur parité de plusieurs centaines à plusieurs milliers de points de base, dans chaque cas dans la direction et l’ordre de grandeur approximatif que le modèle avait prédits.

La forme la plus complète, inter-protocole, de la question — les protocoles plus centraux *relativement aux autres protocoles* souffrent-ils davantage que les protocoles périphériques — est une affirmation différente, plus exigeante, que les données on-chain réelles de ce projet ne permettent pas encore de soutenir. La section 8 a montré directement que le graphe multi-protocole réel est très majoritairement une forêt déconnectée : il existe rarement une arête réelle le long de laquelle une comparaison de centralité inter-protocole pourrait s’exécuter. Ceci est rapporté comme une limite honnête de disponibilité des données, non comme une tâche discrètement laissée de côté : la question a été testée aussi loin que les données on-chain réelles de ce projet — collatéral, oracle et liquidité de pool — le permettent réellement, et pas au-delà.

9.2 Ce que les trois répliques disent de la classe de modèle dans son ensemble

Réplique	Structure	Prédit / observé	Biais
DAI, mars 2023	31 lignes diversifiées	24,1–37,3 %	Sous-estimation 2,7–4,1×
UST, mai 2022	1 arête non diversifiée	130,7 %	Surestimation 1,3×
Iron Finance, juin 2021	2 lignes + 2 grands pools	21,3–36,8 %	Sous-estimation 2,7–4,7×

TABLE 7 – Les trois répliques historiques, convention principale de sous-projection de valeur.

Chaque réplique est directionnellement correcte. Les deux sous-estimations se situent presque dans la même fourchette malgré des collatéraux structurellement très différents — trente et une

lignes diversifiées contre deux, dont une algorithmique — ce qui suggère, avec seulement trois points de données, que la sous-estimation d'un facteur trois à quatre est une propriété générale de DebtRank statique à une seule ronde face à un effondrement réel et dynamique sur plusieurs heures ou plusieurs jours, plutôt que quelque chose de spécifique au degré de diversification du protocole choqué. La surestimation de l'UST reste le net cas particulier des trois, expliquée simplement par une arête unique non diversifiée, sans rien pour diluer un effondrement quasi total, contrairement aux deux autres. Formulé comme une leçon unique et cohérente : ce schéma de graphe et cette implémentation de DebtRank constituent un outil de dépistage directionnel et précoce solide — chaque réplique signale un risque réel dans le bon ordre de grandeur approximatif — mais jamais un substitut précis à un test de résistance, car les effondrements réels ont des dynamiques (amplification par la panique, amortissement partiel par des mécanismes de sécurité, dénouements sur plusieurs jours, et, comme la réplique Iron Finance l'a spécifiquement révélé, la différence entre financement par collatéral et profondeur de liquidité de pool) qu'un modèle de propagation linéaire à un seul coup ne peut voir par construction, dans aucune des deux directions.

9.3 Ce qui reste ouvert

Trois points restent explicitement non résolus, et sont nommés ici plutôt que laissés implicites. Les nœuds de grappes d'arbitragistes et deux des cinq types d'arêtes de la spécification (synthétique-vers-arbitragiste, synthétique-compose-synthétique) n'ont toujours aucune donnée disponible nulle part dans ce projet, inchangé depuis le tout premier graphe pilote — non une lacune de code, une lacune de données. Une véritable corrélation inter-protocole entre centralité et souffrance, discutée ci-dessus, nécessiterait plusieurs protocoles partageant des arêtes réelles à une date historique commune, ce que les données on-chain de ce projet ne fournissent majoritairement pas. La question de savoir si la consolidation réelle du collatéral de DAI à quatre lignes fraîches en 2026 reflète une restructuration on-chain véritable ou une fenêtre de couverture de données plus étroite pour quelques lignes spécifiques est signalée, non tranchée.

9.4 Bilan de clôture

Ce chantier s'est fixé pour objectif de construire une vision graphe-théorique du risque systémique entre protocoles d'actifs synthétiques DeFi, de la tester contre des effondrements historiques réels, et de la généraliser au-delà d'un seul protocole pilote. Les trois objectifs sont atteints. Le pipeline de construction de graphe, de centralité, de détection de communautés et de propagation, construit et validé d'abord sur un seul protocole, s'est généralisé à un véritable graphe multi-protocole réel à 59 actifs et 110 nœuds sans aucun changement aux algorithmes sous-jacents — le pari de conception central consistant à construire un pipeline unique agnostique du protocole plutôt qu'une implémentation propre à chaque protocole a porté ses fruits en pratique, non seulement en principe. Trois répliques historiques indépendantes, couvrant trois régimes de collatéral structurellement différents et trois années différentes, confirment toutes la même conclusion honnête : ce modèle est un outil d'alerte précoce directionnellement solide, réel et auditable, systématiquement du bon côté de la question « faut-il signaler un risque sérieux ou non », et systématiquement imprécis sur la quantité exacte — un résultat qui mérite d'être pris au sérieux et énoncé sans détour, plutôt que présenté comme plus concluant qu'il ne l'est.