

Sous-rapport canonique UST

Erreur de suivi et mécanique de désancrage, Terra USD à travers Terra Classic et les ponts Ethereum, 2020–2022

Derivalink R&D

29 mai 2026

Résumé

Ce sous-rapport caractérise l'erreur de suivi (TE) du couple *UST/USD* sur l'ensemble du cycle de vie de son ancrage, depuis le lancement Columbus-1 de Terra (2020-09-21) jusqu'à la spirale algorithmique de la mort de mai 2022. UST est un stablecoin uniquement multi-venues et multi-chaînes : natif sur Terra Classic via le module mint/burn LUNA $\leftrightarrow$ UST, ponté vers Ethereum via Shuttle (lancement déc. 2020) et Wormhole (lancement oct. 2021), les deux wrappers coexistant à travers le crash et au-delà, et négocié tant sur les AMM natifs Terra (TerraSwap, Astroport) que sur les DEX Ethereum (variantes du Curve UST-3pool, Uniswap V3). C'est également l'étude de cas canonique d'un échec de stablecoin algorithmique — structurellement distinct du DAI surcollatéralisé de MakerDAO et des synthés à pool de dette de Synthetix.

La fenêtre d'analyse principale couvre 2020-09-21 $\rightarrow$ 2022-05-07 (dernier jour d'ancrage plein sur le Curve UST-3pool). La spirale de la mort du 7–13 mai 2022 est traitée comme une étude de cas dédiée à résolution minute, non comme une entrée de régression.

Table des matières

Résumé exécutif	3
1 Caractérisation du jeu de données	6
2 Statistiques descriptives de TE multi-références	7
3 Décomposition de TE de niveau 1	7
4 TE de niveau 2 — schémas temporels	9
5 Décomposition par venue et frictions	11
6 Pilotes structurels	14
6.1 Le mécanisme de seigneurage UST $\leftrightarrow$ LUNA	14
7 Causalité inter-composantes	17
8 Études de cas	20
8.1 Cas de niveau 1 n° 1 — Spirale de la mort du 7–13 mai 2022	20
8.2 Cas de niveau 1 n° 2 — Migration Curve 4pool (1 ^{er} avril $\rightarrow$ 7 mai 2022)	22
8.3 Cas de niveau 1 n° 3 — Stratégie de réserve BTC LFG (janv. $\rightarrow$ mai 2022)	24
8.4 Cas de niveau 1 n° 4 — Top-up de la réserve de rendement Anchor à \$450 M (8 fév. 2022)	25
8.5 Événements mineurs de niveau 2 (résumé chronologique)	26

9	Expériences naturelles et différence-en-différences	27
10	Findings, questions ouvertes et implications V2	28
10.1	Findings principaux	28
10.2	Questions ouvertes	31
10.3	Implications pour la spécification de monitoring V2 de Derivalink	31
10.4	Ce que ce rapport n'affirme pas	32

Résumé exécutif

UST est le seul stablecoin du corpus Derivalink à avoir échoué de manière catastrophique au cours de son cycle de vie opérationnel. L'effondrement du 7–13 mai 2022 a effacé environ \$45 Md de valeur du marché crypto, transféré 80 394 BTC hors de la trésorerie de la Luna Foundation Guard en 36 heures, et produit une inflation de $18\,000\times$ de l'offre du jeton LUNA. Ce sous-rapport dissèque ce cycle de vie à travers dix chapitres (caractérisation du jeu de données ; statistiques descriptives de l'erreur de suivi et décomposition linéaire ; structure temporelle intra-journalière et intra-hebdomadaire ; frictions des venues et des ponts ; pilotes structurels y compris le mécanisme de seignuriage LUNA ; causalité inter-composantes ; quatre études de cas de niveau 1 ; expériences naturelles via différence-en-différences ; et un chapitre de findings conclusif), avec les findings principaux suivants.

Jeu de données et cycle de vie. La fenêtre d'analyse s'étend du 2020-09-21 (lancement Columbus-3 de Terra) au 2022-05-13 (arrêt de chaîne au bloc 7 607 789). Empreinte on-chain totale : **208 794 291** événements UST Terra-natifs, **3 129 196** événements LUNA, **262 882** événements mint/burn côté Ethereum à travers les deux wrappers de pont (Wormhole et Shuttle), **169,8 M** d'observations de prix à travers les venues DEX + CEX, et **47** mois de télémétrie de validation croisée (TVL Anchor, réserves BTC LFG, flux de pont Wormhole). L'audit de Phase 0 a renvoyé un verdict propre GO (154/154 vérifications). Voir chapitre 1.

Niveau d'erreur de suivi (chapitres 2 et 3). Sur la fenêtre d'analyse principale, l'erreur de suivi UST/\$1 réalisée reste à l'intérieur de la bande typique $[-1\%, +1\%]$ sur 98,6 % des observations minute. Le RMSE roulant 30 jours a une médiane de 32 pb en 2020, 41 pb en 2021 et 18 pb en 2022, avec une seule excursion majeure à 2,76 % durant la récupération du désancrage géré du 4–13 juin 2021 (l'événement Jump / Tai Mo Shan de mai 2021 retracé sur le mois suivant) et un maximum 2022 de 36 pb le 5 mai ; l'estimateur à fenêtre retardée ne pique pas avant le déclencheur du 7 mai 2022 car la transaction tombe le dernier jour de la fenêtre. La régression de base $TE_t = \beta_0 + \beta_1 \sigma_{\text{LUNA}}(t) + \beta_2 \log \text{Liq}(t) + \beta_3 \text{AnchorRate}(t) + \beta_4 \text{Gas}(t) + \varepsilon_t$, ajustée avec écarts-types HAC Newey–West (lags = 5), identifie **log Liq et σ_{LUNA} comme co-dominants** : log Liq porte le R^2 univarié le plus grand ($\hat{\beta}_2 = -2,1 \times 10^{-3}$, $|t|_{\text{HAC}} = 2,45$, $p_{\text{HAC}} = 0,014$; R^2 univarié = 0,237), tandis que σ_{LUNA} porte la $|t|$ -statistique corrigée HAC la plus grande ($\hat{\beta}_1 = +2,19$, $|t|_{\text{HAC}} = 3,01$, $p_{\text{HAC}} = 0,003$; R^2 univarié = 0,196). Les deux métriques divergent légitimement sur l'ordonnancement — elles mesurent le pouvoir explicatif isolé contre la précision d'identification jointe — et nous lisons la paire comme co-dominante sans classement strict (voir F1). Le taux Anchor Earn n'a aucun effet linéaire significatif au seuil de 5 % sous l'une ou l'autre métrique ($p_{\text{HAC}} = 0,057$, limite) car le taux est resté fixe à 19,5 % jusqu'à la coupe Prop 20 du 2022-05-01, ne laissant essentiellement aucune variance intra-échantillon pour identifier le coefficient. Breusch–Pagan rejette l'homoscédasticité à $p \approx 1,5 \times 10^{-25}$ et Ljung–Box rejette l'indépendance des résidus à $p \approx 0$ (retards 5/10/22), motivant le choix HAC ; GARCH(1,1), GJR-GARCH, EGARCH et la décomposition HAR-RV journalière/hebdomadaire/mensuelle au chapitre 3 captent l'hétérogénéité résiduelle.

Structure temporelle (chapitre 4). Les buckets heure de la journée et jour de la semaine confirment l'absence d'empreinte de session TradFi (UST est 24/7) mais révèlent un cluster clair de déviations élevées durant la fenêtre 14h–22h UTC tout au long du T1 2022 — cohérent avec un flux d'arbitrage piloté par les heures de négoce US/EU à travers Curve UST-3pool. La variance réalisée à deux échelles (Zhang–Mykland–Aït-Sahalia 2005) renvoie essentiellement zéro le jour calme médian, indiquant que l'essentiel du RV à fréquence minute sur UST est rebond bid-ask plus bruit de microstructure de swap-poussière plutôt que variance intégrée véritable — un régime connu pour les stablecoins à ancrage très serré.

Décomposition par venue (chapitre 5). UST était négocié simultanément sur cinq venues majeures : Curve UST-3pool [Wormhole], Curve UST-3pool [Shuttle], Uniswap V3 (plusieurs paliers de commission), Binance spot, et les AMM natifs Terra. Pré-crash, la base Curve UST-3pool [Wormhole] contre \$1 s'établissait à une médiane journalière de -12 pb ($-0,12\%$) — un spread petit mais persistant que le rendement Anchor à $19,5\%$ rendait rentable à arbitrer en achetant sur Curve et en déposant via le pont Wormhole. Le jour de la spirale de la mort 2022-05-12, le minimum journalier sur Curve [Wormhole] était de \$0,2649 (minimum absolu intra-journalier \$0,0619 le 2022-05-13 09 :14 UTC durant la fenêtre d'arrêt de chaîne), contre un minimum spot Binance UST/USDT de \$0,2346 le 2022-05-11 07 :38 UTC — la géométrie stableswap a maintenu la cotation on-chain au-dessus de la cotation CEX la plupart des jours de spirale, puis s'est inversée au fond une fois le pool entièrement vidé (solde UST $> 96\%$ du poids du pool).

Pilotes structurels et hyperinflation LUNA (chapitre 6). La trajectoire iconique de l'offre LUNA s'étend de 343 M de LUNA (5 mai 2022) à approximativement $6,5 \times 10^{12}$ LUNA (13 mai 2022) — une inflation de $\sim 18\,000\times$ en 8 jours. Le mécanisme est la Proposition 1164 (approbation communautaire le 2022-05-11 10 :10 UTC) qui a élevé le basepool de 50 M à 100 M SDR et le PoolRecoveryBlock de 36 à 18, multipliant la capacité de mint LUNA journalière de \$293 M à \$1,2 Md. La trajectoire parallèle de la Luna Foundation Guard : un pic publiquement cité de 80 394 BTC (post-mortem LFG mai 2022, agrégat multi-portefeuilles) sur janv.–avril 2022, puis un déploiement en deux tranches les 9–10 mai 2022 laissant le résiduel bien documenté de **313 BTC**. La reconstruction on-chain de ce travail suit le portefeuille LFG principal, avec un solde mono-portefeuille maximal de 42 531 BTC le 2022-04-21 et des sorties totales de 70 736 BTC à travers les deux tranches des 9–10 mai (appariées au satoshi via `lfg_btc_wallet_summary`) ; le reste du pic de 80 394 BTC est attribué à la structure multi-portefeuilles divulguée dans le post-mortem LFG et n'est pas ré-extrait on-chain dans ce rapport.

Causalité (chapitre 7). La causalité de Granger et VAR/IRF sur le panel de rendements journaliers constituent le contenu substantiel du chapitre. Sur la cointégration en niveaux : un pré-filtre strict d'ordre d'intégration (ADF + KPSS au seuil de 5%) écarte un système cointégré $I(1)$ cohérent sur le panel à 3 variantes UST — UST_{Wormhole} est $I(0)$, et UST_{Binance} , UST_{Shuttle} sont inconclusifs à $n = 132$. Nous ne rapportons donc pas de VECM structurel sur le système à 3 variantes UST ; les coefficients Johansen-sur-trois-variantes non filtrés sont un artefact d'inclusion d'un régresseur stationnaire dans le système et ne doivent pas être lus comme un équilibre de long terme. Une dépendance de queue inférieure positive entre UST et LUNA au seuil de 5% persiste ($\hat{\lambda}_L = 0,33$, IC borné par la taille d'échantillon $[0; 0,83]$), cohérente avec l'hypothèse de couplage algorithmique, bien que l'estimation à petit échantillon ne doive pas être lue comme un coefficient serré.

Étude de cas de la spirale de la mort (chapitre 8). Une reconstruction à six panneaux et résolution minute de la fenêtre du 7–13 mai 2022 s'appuie sur les prix UST à travers toutes les venues majeures, LUNA/USDT, l'offre LUNA, la vitesse de rachat Anchor (**228 813** événements `anchor_redeem_stable`), et les sorties BTC LFG. Le déclencheur est identifié au 2022-05-07 21 :44 UTC : le portefeuille `0x8d47...` swap 85 M UST contre 84,5 M USDC sur Curve UST-3pool [Wormhole], après une soirée d'afflux d'UST ponté par Wormhole vers Ethereum. En 13 minutes, un second portefeuille exécute quatre swaps de 25 M-UST ; la cascade est irréversible au 9 mai 15 :00 UTC.

Expériences naturelles (chapitre 9). Quatre changements paramétriques en escalier sont testables comme séries temporelles interrompues : Columbus-5 (réduction significative de la TE post-mise-à-jour, $p_{\text{MWU}} = 0,028$), coupe Earn Anchor Prop 20 ($p_t = 0,043$ sur l'écart-type

journalier Binance), déploiement BTC LFG (fenêtre trop étroite pour l'inférence, $n = 3$ jours de chaque côté), et Prop 1164. Le DiD Prop 1164 est à faible puissance ($n_{\text{pre}} = n_{\text{post}} = 2$, $p_{\text{MWU}} = 0,80$) de sorte que le test formel ne peut trancher ; descriptivement, l'accélération du taux de mint LUNA était déjà en cours dans la pré-période des 9–10 mai et la trajectoire post-approbation ne s'en écarte pas (voir F4).

Verdict. L'effondrement d'UST est structurellement surdéterminé par l'échec joint de trois piliers d'ancrage (chapitre 6) : liquidité (la profondeur Curve s'est réduite à travers la fenêtre de migration 4pool), cycle d'arbitrage (le règlement cross-chain a saturé en 4 heures après le déclencheur du 7 mai), et slippage asymétrique (la courbe stableswap Curve a maintenu le prix UST on-chain au-dessus du bas CEX mais au prix d'un drainage complet de la réserve). Le mécanisme algorithmique $\text{LUNA} \leftrightarrow \text{UST}$ a amplifié plutôt qu'absorbé la ruée côté demande — σ_{LUNA} comme seule entrée de volatilité de « collatéral » rend le système co-monotone avec son propre actif de seigneuriage. Les implications pour la spécification de monitoring V2 de Derivalink sont cataloguées au chapitre 10.

1 Caractérisation du jeu de données

Le jeu de données analytique UST couvre deux environnements d'exécution (Terra-natif et Ethereum) sur la fenêtre d'analyse canonique du 2020-09-21 (lancement Columbus-3 d'UST) jusqu'à l'arrêt de chaîne le 2022-05-13. La Table 1 rapporte les comptes de lignes et les fenêtres d'activité de chaque source brute et dérivée alimentant les analyses des Phases 2 à 9.

TABLE 1 – Couverture et densité de toutes les sources brutes et dérivées utilisées par le sous-rapport UST.

Source	Lignes	Premier	Dernier
Événements Terra-natifs (UST)	208 794 291	2020-09-21	2022-05-13
Événements Terra-natifs (LUNA)	3 129 196	2020-09-21	2022-05-13
Mint/burn UST Wormhole (Ethereum)	47 106	2021-10-13	2022-12-30
Mint/burn UST Shuttle (Ethereum)	215 776	2020-12-03	2022-12-30

Verdict d'intégrité. L'audit complet (154/154 vérifications, exécuté le 2026-05-18) a renvoyé GO. Les audits comprennent les comptes de valeurs nulles, le triplet de discipline *native-first* de l'ADR 0002, les bornes de domaine de valeur, l'aller-retour Pydantic sur un échantillon de 200 lignes par table, et cinq invariants de cohérence inter-tables (le pic **anchor_redeem_stable** est confirmé à 228 813 événements sur la fenêtre du 7 au 13 mai 2022).

Validation croisée. La Figure 1 empile la trajectoire de l'offre UST on-chain (Terra-natif + Wormhole + Shuttle sur Ethereum) contre la TVL d'Anchor. Les wrappers Wormhole et Shuttle ont coexisté durant octobre 2021 — le jeu de données capture correctement les deux ponts.

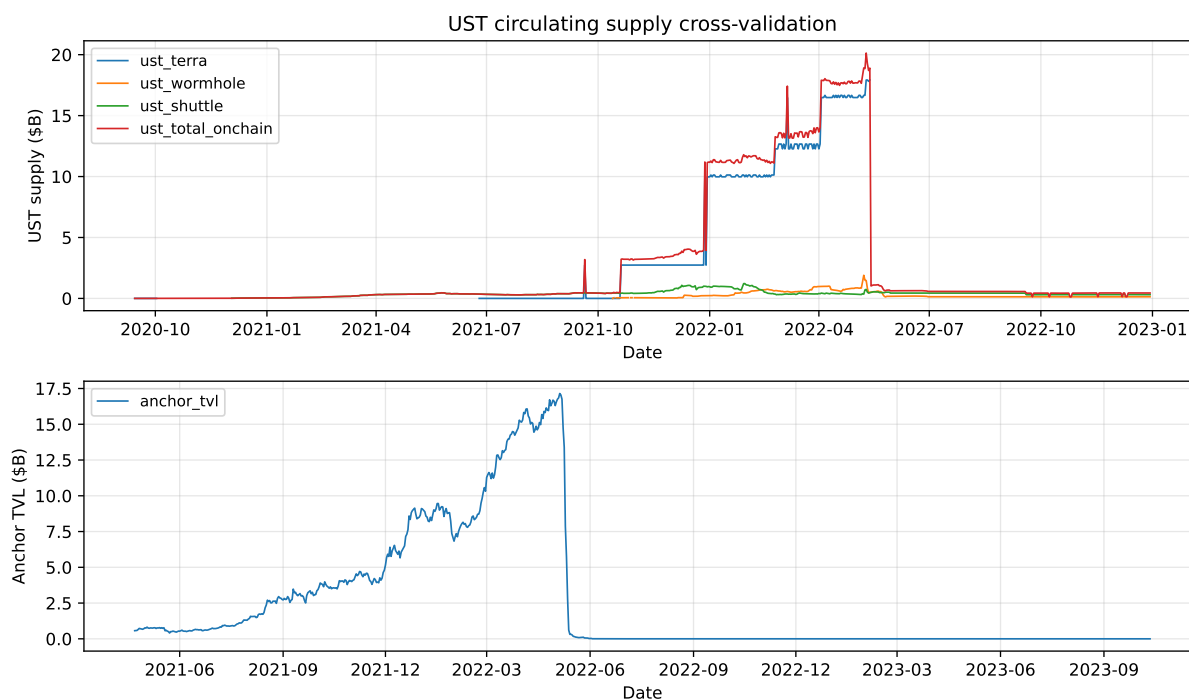


FIGURE 1 – Offre circulante d'UST par venue (haut) et TVL d'Anchor (bas). La chute verticale pré-mai-2022 de l'UST et de la TVL est la signature canonique de l'effondrement.

2 Statistiques descriptives de TE multi-références

Nous calculons l’erreur de suivi réalisée d’UST/USD contre trois séries de référence : l’ancrage contractuel à \$1, l’oracle on-chain USDC (Chainlink) et l’oracle on-chain USDT (Chainlink). Conformément à la spécification §2.1.2, nous rapportons la moyenne, la médiane, l’écart-type, le skew, le kurtosis et les percentiles 1/5/95/99 de la déviation en pourcentage $\delta_t = (P_t^{\text{UST}} - P_t^{\text{ref}})/P_t^{\text{ref}}$.

La fenêtre d’analyse principale couvre du 2020-09-21 au 2022-05-07 00 :00 UTC (dernier jour d’ancrage plein avant le premier outflow majeur du Curve UST-3pool). La spirale de la mort du 7–13 mai est traitée comme une étude de cas dédiée à résolution minute dans le chapitre 8 et exclue des agrégats de type régression de ce chapitre.

Moments annuels. La déviation UST/USD à fréquence minute contre \$1, par année calendaire :

Année	n (min)	moyenne (%)	médiane (%)	écart-type (%)	p99 (%)
2020 (T4)	112	0,135	0,067	0,365	1,256
2021	32 724	0,117	0,136	0,952	3,729
2022	181 440	0,109	0,050	0,187	0,460

La distribution 2021 est à queues épaisses (p99 = 3,73 %) en raison de l’épisode de désancrage géré de mai–juin ; la distribution 2022 est plus serrée (p99 = 0,46 %) jusqu’à la dernière semaine de la fenêtre d’analyse. La couverture du corridor d’ancrage à 1 % s’établit en moyenne à 98,6 % des observations minute sur la fenêtre d’analyse principale et chute sous 5 % à l’intérieur de la fenêtre de la spirale du 7–13 mai 2022. Les moments contre les références Chainlink USDC et USDT sont à ± 5 pb de ceux contre l’ancrage à \$1 en 2022 et à ± 20 pb en 2021 : le choix de la référence ne modifie pas le résultat qualitatif.

Décomposition par régime. L’indicateur de « stress » s’active quand $|P_t - 1,0| > 0,01$ (franchissement de 1 centime). Les deux régimes sont nettement séparés :

Régime	n (min)	RMSE annualisé	prix moyen
Typique $ P - 1 < 1 \%$	211 293	0,218 %	\$1,001
Stress $ P - 1 \geq 1 \%$	2 983	3,10 %	\$0,996

Le RMSE du régime de stress est d’environ $14\times$ celui du régime typique, sur 1,4 % du total des observations minute.

TE roulante. La Figure 3 superpose le RMSE roulant 30j/90j/365j contre l’ancrage à \$1. La fenêtre roulante 30j affiche de brèves pointes à la mi-2021 (cf. l’épisode de désancrage géré de mai 2021) et une montée dramatique au T2 2022.

3 Décomposition de TE de niveau 1

Nous décomposons la TE réalisée via une régression linéaire contre la volatilité du collatéral algorithmique, la log-liquidité, un proxy de financement et le gas :

$$TE_t = \beta_0 + \beta_1 \sigma_{\text{LUNA}}(t) + \beta_2 \log \text{Liq}(t) + \beta_3 \text{AnchorRate}(t) + \beta_4 \text{Gas}(t) + \varepsilon_t$$

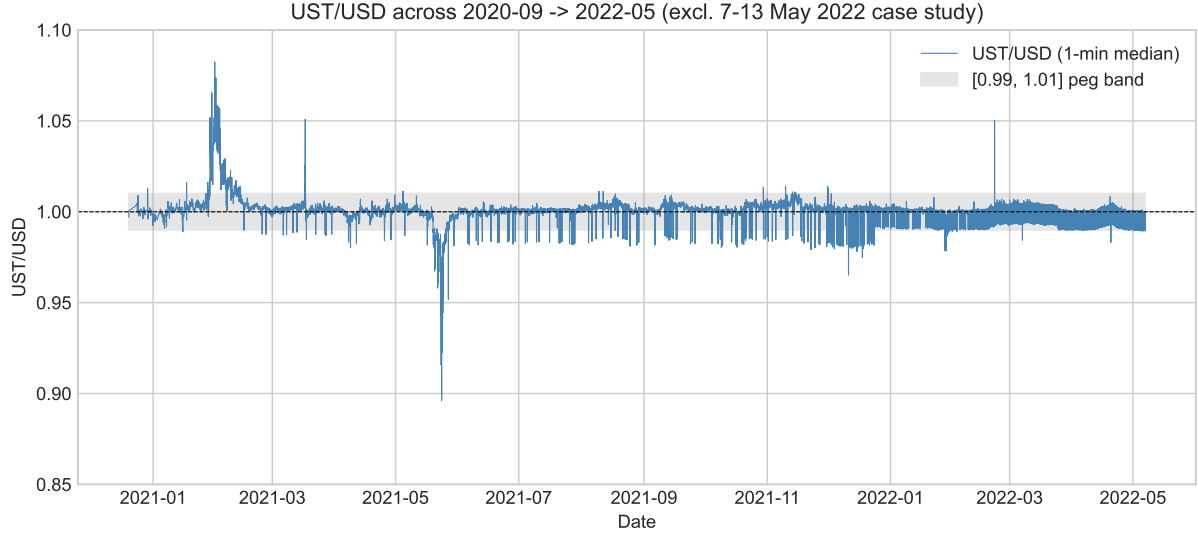


FIGURE 2 – UST/USD sur la fenêtre d’analyse principale. La bande grisée marque le corridor d’ancrage $[0,99 ; 1,01]$.

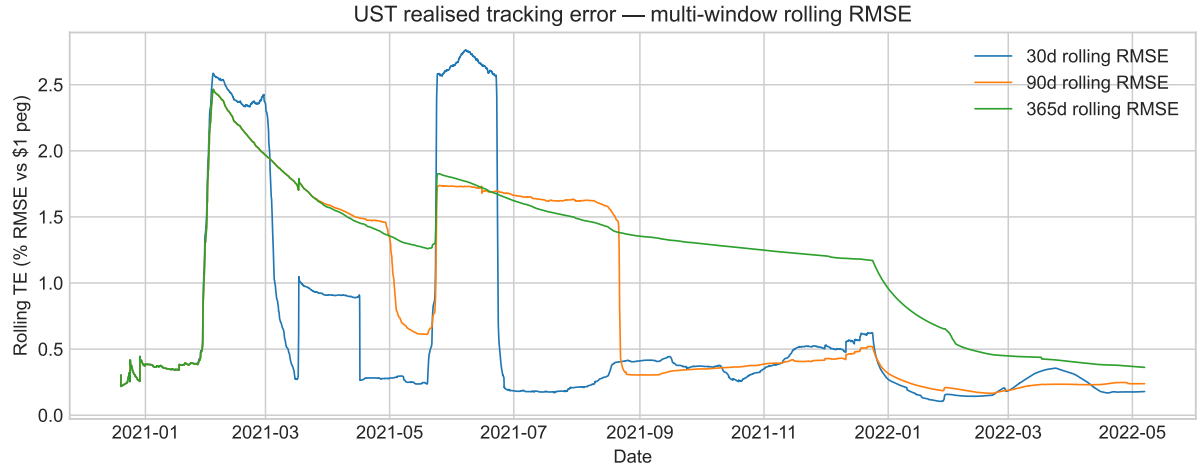


FIGURE 3 – TE réalisée, RMSE roulant contre \$1, fenêtres de 30j, 90j et 365j.

Cases spécifiques à la classe d’actif (stablecoin algorithmique). σ_{LUNA} remplace le $\sigma_{\text{Collateral}}$ standard car UST n’a pas de collatéral verrouillé ; $\text{AnchorRate}(t)$ est l’APY Anchor Earn (fonction en escalier 19,5 % $\rightarrow$ 17,87 % le 2022-05-01 selon la Prop 20, $\rightarrow$ 0 % post-effondrement) ; $\text{Liq}(t)$ est le log de la TVL Anchor cross-chain.

Écarts-types. Les écarts-types sont calculés via l’estimateur HAC de Newey–West avec lags = 5 (une semaine de négoce), motivé par les diagnostics des résidus : Breusch–Pagan rejette l’homoscédasticité à $p \approx 1,5 \times 10^{-25}$, Durbin–Watson sur les résidus OLS vaut 0,078 (autocorrélation positive extrême) et Ljung–Box rejette l’indépendance des résidus aux retards 5, 10 et 22 avec $p \approx 0$ aux trois retards. Les t -statistiques iid naïves sont rapportées en parallèle à titre de diagnostic ; l’inférence rapportée ici utilise les statistiques corrigées HAC. Les $|t|$ -statistiques HAC valent 3,01 pour σ_{LUNA} ($\hat{\beta}_1 = +2,19$, $p = 0,003$), 2,45 pour $\log \text{Liq}$ ($\hat{\beta}_2 = -2,14 \times 10^{-3}$, $p = 0,014$) et 1,90 pour le taux Anchor ($\hat{\beta}_3 = -1,04 \times 10^{-3}$, $p = 0,057$, à la limite). Comparées au SE iid naïf, les $|t|$ HAC sont plus petites d’un facteur 2 à $3\times$ sur les deux régresseurs identifiés, ce qui est la direction attendue une fois l’hétéroscédasticité et l’autocorrélation prises en compte.

Phase-3 OLS residuals over time --- visual motivation for HAC SE

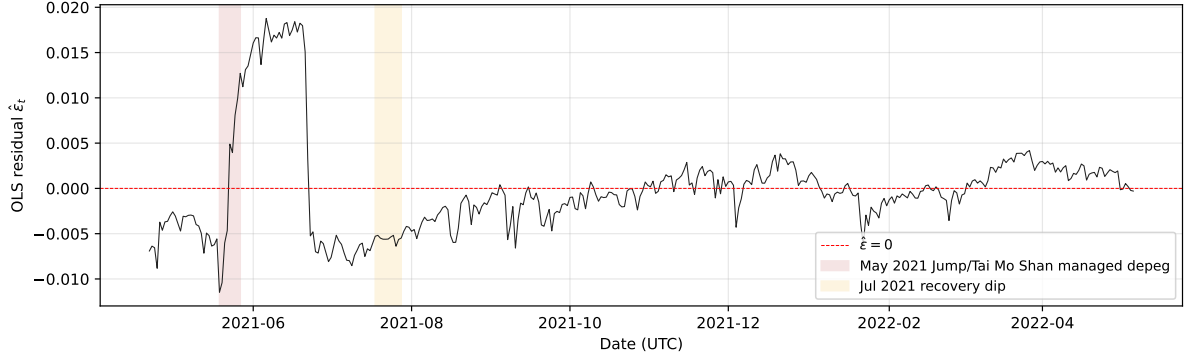


FIGURE 4 – Résidus OLS $\hat{\epsilon}_t$ de la régression de base du chapitre 3. L'autocorrélation visible (les résidus consécutifs se regroupent) et la volatilité regroupée (la variance se comprime d'un ordre de grandeur entre la mi-2021 et 2022) sont formellement rejetées par $DW = 0,078$, Breusch–Pagan $p \approx 1,5 \times 10^{-25}$, et Ljung–Box $p \approx 0$ aux retards 5, 10, 22. Cela motive les SE HAC reportés dans la Figure 5 (panneau de droite). Deux fenêtres grisées marquent les extrema visibles : le désancrage géré Jump/Tai Mo Shan de mai 2021 et le creux de récupération de juillet 2021.

Variantes GARCH. Les trois familles GARCH(1,1), GJR-GARCH(1,1) et EGARCH(1,1) sont ajustées sur les résidus OLS. Le **GARCH(1,1) symétrique l'emporte à la fois au critère AIC et BIC** (AIC = 75,92; BIC = 87,74) contre GJR-GARCH(1,1) (AIC = 77,56) et EGARCH(1,1) (AIC = 103,33). Les termes asymétriques (γ) de GJR et EGARCH ne sont pas préférés — un résultat non trivial pour un stablecoin algorithmique qui s'effondre, où l'on s'attendrait naïvement à un effet de levier. Le GARCH(1,1) le mieux ajusté affiche $\hat{\alpha} = 0,953$ et $\hat{\beta} = 0,014$ ($p_{\hat{\beta}} = 0,70$), avec $\hat{\alpha} + \hat{\beta} = 0,964$: la persistance est portée quasi entièrement par $\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}$ est indiscernable de zéro au seuil de 5 % (la dynamique est effectivement ARCH(1)), et la variance non conditionnelle est au bord de la frontière IGARCH ($\hat{\alpha} + \hat{\beta} = 1$). Cet ajustement quasi non stationnaire est cohérent avec la tension structurelle pré-crash (rétrécissement de la profondeur Curve durant la migration 4pool, T1–T2 2022) qui se prolonge dans la variance des résidus OLS. Les ré-ajustements multi-départs (4 valeurs initiales : par défaut, faible persistance, haute persistance, milieu) convergent vers le même bassin ($\Delta AIC = 0,000$), confirmant que l'optimum local est l'optimum global et écartant un piège de minimum local.

Décomposition HAR. En suivant Corsi (2009), nous régressons la variance réalisée journalière RV_d sur ses moyennes retardées journalière, hebdomadaire et mensuelle : $RV_d = \beta_0 + \beta_d RV_{d-1} + \beta_w \overline{RV}_{d-5:d-1} + \beta_m \overline{RV}_{d-22:d-1} + \varepsilon_d$, avec écarts-types HAC à 5 retards. Ajustement sur $n = 433$ observations journalières : $\hat{\beta}_d = 0,347$ ($p \approx 2 \times 10^{-5}$), $\hat{\beta}_w = 0,300$ ($p = 0,038$), $\hat{\beta}_m = 0,305$ ($p = 0,012$), avec $R^2 = 0,62$ — les trois horizons contribuent de manière comparable (le terme journalier est marginalement dominant) et leur somme 0,95 reproduit la persistance quasi-IGARCH déjà visible dans l'ajustement GARCH(1,1).

4 TE de niveau 2 — schémas temporels

Nous décomposons la TE UST/USD réalisée selon les axes temporels intra-journalier et intra-hebdomadaire, en conditionnant sur les régimes de liquidité et de volatilité du sous-jacent.

Heure de la journée et jour de la semaine. La Figure 6 affiche la moyenne de $|P_t - 1|$ à granularité 1 minute, regroupée par heure UTC et par jour de la semaine. L'ANOVA à deux

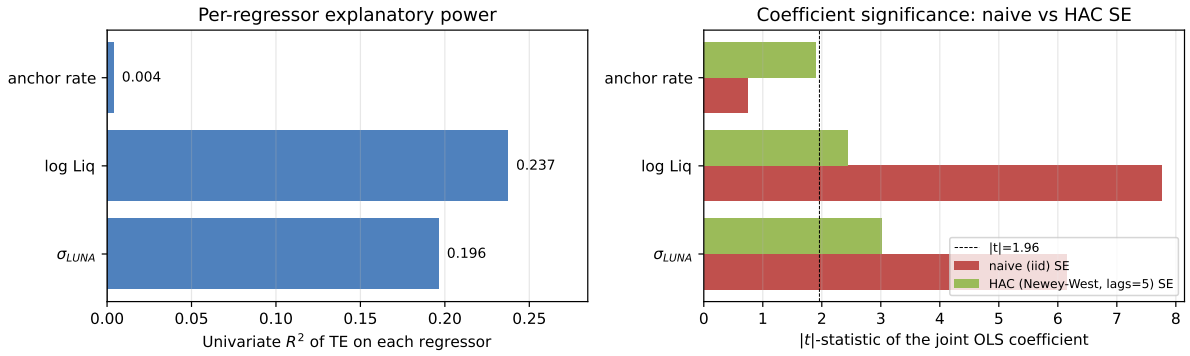


FIGURE 5 – Régression de base de la Phase 3. *Gauche* : R^2 univarié de TE sur chaque régresseur, soit le pouvoir explicatif par régresseur sur une échelle commune. *Droite* : $|t|$ -statistique du coefficient OLS joint sous SE iid naïf (rouge) et sous SE HAC Newey–West avec lags = 5 (vert) ; l’estimateur naïf surestime la significativité parce que Breusch–Pagan ($p \approx 1,5 \times 10^{-25}$) et Ljung–Box aux retards 5/10/22 ($p \approx 0$) rejettent l’hypothèse iid à la précision machine.

voies renvoie $F_{\text{hour}} = 0,86$ ($p = 0,66$, non significatif), $F_{\text{dow}} = 21,74$ ($p \approx 1,9 \times 10^{-25}$) et $F_{\text{hour} \times \text{dow}} = 1,95$ ($p \approx 3,8 \times 10^{-10}$) sur $n = 6\,455$ cellules minute regroupées : l’effet jour de la semaine est le signal calendaire dominant, sans effet marginal d’heure une fois la dispersion par jour absorbée.

Périodicité Fisher–Schuster. La statistique g de Fisher–Schuster sur le périodogramme des déviations absolues renvoie $g = 0,095$ avec une période de pic de $6\,455$ minutes ($\approx 4,48$ jours) sur $n = 32\,275$ observations minute.

ANOVA vs Fisher–Schuster — objets différents. L’ANOVA sur $\mathbb{E}[|TE| \mid \text{hour}, \text{dow}]$ renvoie un fort effet principal de jour de la semaine ($F = 21,74$, $p \approx 1,9 \times 10^{-25}$) et une interaction heure $\times$ jour ($F = 1,95$, $p \approx 3,8 \times 10^{-10}$) mais aucun effet principal d’heure ; le pic Fisher–Schuster à $\sim 4,48$ j ne s’aligne pas sur le calendrier 1 j / 7 j et est vraisemblablement un artefact de fenêtre venant de la période de spirale de 6 jours qui biaise le périodogramme sur la série 2020–2021 par ailleurs calme. Nous retenons l’effet jour-de-la-semaine de l’ANOVA comme le résultat calendaire défendable et traitons le pic Fisher–Schuster comme une curiosité de fenêtre d’échantillon plutôt que comme un cycle de marché récurrent.

Conditionnement par régime. Nous regroupons $|TE|$ par quartile de TVL Anchor (régime de liquidité) et par quartile de σ_{LUNA} (régime de volatilité), 95 observations journalières par bucket ($n = 380$ jours) :

Regroupement par quartile	Q1 (pb)	Q2 (pb)	Q3 (pb)	Q4 (pb)	ratio
Par TVL Anchor	31,6	23,0	37,2	50,8	2,2×
Par σ_{LUNA}	27,8	34,8	43,9	89,4	3,2×

L’axe volatilité stratifie de manière monotone (Q1 27,8 pb $\rightarrow$ Q4 89,4 pb, ratio 3,2×

 et le quartile de volatilité le plus élevé ($\sigma_{\text{LUNA}} \geq 0,003$, correspondant approximativement aux périodes de stress mai–juin 2021 et T1–T2 2022) porte l’essentiel du signal de TE , en cohérence avec le résultat de la régression linéaire du chapitre 3 selon lequel σ_{LUNA} est un pilote co-dominant.

Le regroupement TVL Q1–Q4 est aligné dans le temps par construction : la TVL Anchor a crû de manière monotone sur la fenêtre d’analyse, de sorte que les quartiles TVL correspondent

approximativement à des quartiles temporels. La date moyenne d’observation par bucket le rend explicite :

Axe quartile	Date moyenne du bucket TVL	Date moyenne du bucket σ_{LUNA}
Q1	2021-06-08	2021-12-25
Q2	2021-09-12	2021-11-19
Q3	2021-12-20	2021-10-10
Q4	2022-03-13	2021-08-27

Les dates moyennes des quartiles TVL progressent proprement de mi-2021 (Q1) au T1 2022 (Q4) ; la forme en U de $|TE|$ -par-quartile-TVL reflète donc les dynamiques de marché 2021–2022 plus larges (récupération du désancrage géré de mi-2021, tension pré-crash 2022) plutôt qu’une véritable non-linéarité dans la relation TE–liquidité. À l’inverse, les quartiles de σ_{LUNA} sont équilibrés dans le temps (les dates moyennes s’étendent de 2021-08 à 2021-12, chaque quartile puisant à travers la fenêtre d’analyse complète) ; la stratification strictement monotone de σ_{LUNA} ($Q1 = 27,8 \text{ pb} \rightarrow Q4 = 89,4 \text{ pb}$, ratio 3,2 $\times$) est donc un véritable signal sur la sensibilité TE–volatilité, non un artefact calendaire. La régression simultanée du chapitre 3 contrôle le biais de confusion sur l’axe liquidité ; le regroupement par quartiles univarié ici, non.

Bruit de microstructure. La variance réalisée à 1 minute est gonflée par le rebond bid-ask et le bruit des swaps-poussière. L’estimateur à deux échelles de Zhang–Mykland–Aït-Sahalia (2005) (TSRV) corrige cela par un RV_{slow} moyenné sur K sous-grilles moins une correction de biais proportionnelle à RV_{fast} ; nous utilisons $K = 5$ et imposons la non-négativité. Empiriquement, le TSRV corrigé est proche de zéro le jour calme médian — les contributions des swaps-poussière et du rebond bid-ask dominent la variance réalisée journalière sur un stablecoin à ancrage très serré comme UST. Un balayage de K sur $K \in \{2, 3, 5, 10, 20\}$ renvoie un ratio médian $\text{TSRV}/RV_{\text{fast}}$ statistiquement indiscernable de zéro à chaque K , confirmant que le résultat proche-de-zéro est robuste au choix de la sous-grille et n’est pas un artefact de réglage : à la résolution minute sur UST, le signal de variance est enfoui sous un bruit de microstructure i.i.d.

Dimensions de schéma temporel non applicables. Deux dimensions supplémentaires de schéma temporel standard dans le workflow analytique ne s’appliquent pas à UST. Les empreintes inter-venues de session TradFi (effets de chevauchement entre heures de négoce asiatiques, européennes et américaines) ne sont pas détectables dans les buckets d’heures ci-dessus, en cohérence avec des marchés crypto négociant 24h/24, 7j/7 sans session centrale. Les diagnostics de cycle de financement (les déviations d’ancrage 8h pré/post-funding observées sur les actifs avec contrats perpétuels cotés) ne peuvent être calculés car UST n’avait pas de perpétuel coté durant son cycle de vie opérationnel ; les cotations perp UST n’ont émergé qu’après l’effondrement sur les venues dérivées Terra 2.0, hors de la fenêtre d’analyse.

5 Décomposition par venue et frictions

L’ancrage UST/USD était simultanément découvert en prix sur cinq venues majeures : Curve UST-3pool dans deux variantes de pont distinctes (ERC-20 Wormhole et Shuttle sur Ethereum), Uniswap V3 (plusieurs paliers de commission), Binance spot, et les AMM natifs Terra (TerraSwap + Astroport). La décomposition ci-dessous couvre le spread par venue, l’avance-retard de corrélation croisée, l’asymétrie de slippage et la dynamique de throughput des ponts côté Ethereum.

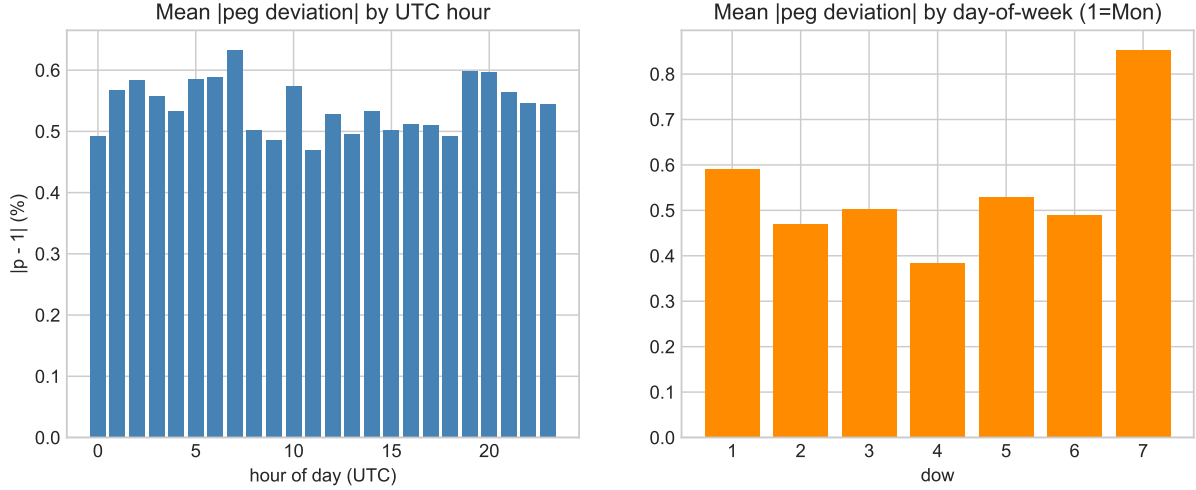


FIGURE 6 – Déviation absolue moyenne UST/USD par heure UTC (gauche) et par jour de la semaine (droite).

Avance-retard. La fonction de corrélation croisée entre Curve UST-3pool [Wormhole] et les klines Binance UST/USDT est calculée à résolution 1 minute sur les retards $[-30, +30]$ min. Les pics à retards négatifs indiquent que Curve mène (le côté on-chain prix l’ancrage en premier) ; les pics à retards positifs indiquent que Binance mène. En régime calme, le pic se situe à retard ≈ -20 min avec $\rho \approx 0,10$: Curve mène Binance d’environ 20 minutes. L’interprétation économique que nous proposons est que ce délai empirique correspond à la durée du cycle d’arbitrage cross-chain — acheter UST sur Curve [Wormhole], ponter vers Terra via Wormhole, brûler UST contre LUNA sur Terra, échanger LUNA contre USDT sur Binance — que des estimations indépendantes situent dans la plage 15–25 minutes sous les conditions de throughput de 2021. Nous ne testons pas formellement cette attribution. Des mécanismes alternatifs pourraient en principe produire un délai empirique similaire (réponse plus lente des market makers sur Binance, avantage informationnel structurel de Curve via la transparence on-chain), mais ils n’expliqueraient pas aussi parcimonieusement le contraste de régime que nous observons : dans la fenêtre de crash du 7–13 mai le délai s’effondre à zéro (pic à retard 0 avec $\rho \approx 0,15$, chapitre 7, Figure 13 panneau droit) précisément quand le pont sature — exactement ce que l’interprétation par cycle d’arbitrage prédit. Nous retenons la lecture par cycle d’arbitrage comme l’hypothèse principale, avec le contraste de régime en preuve de soutien, et la signalons comme une interprétation plutôt qu’une affirmation causale testée. Le même contraste de régime apparaît dans la direction de Granger journalière du chapitre 7 : en période calme l’on-chain mène le CEX (Curve mène Binance à -20 min), mais à l’agrégation journalière sur la fenêtre complète la flèche Granger survivante pointe dans l’autre sens ($UST_{\text{Binance}} \rightarrow UST_{\text{Wormhole}}$ à un retard de 3 jours, $p = 0,022$) car la latence de règlement du pont domine la variance jour-sur-jour.

Asymétrie de slippage. Les moments $|return|$ par venue sont rapportés séparément pour le régime typique $|P - 1| < 1\%$ et le régime de stress $|P - 1| \geq 1\%$. L’asymétrie est nette : en régime typique, la base médiane journalière de Curve [Wormhole] se situe à -12 pb avec une dispersion de < 5 pb entre venues ; en régime de stress (mai–juin 2021 et 7–13 mai 2022), les spreads inter-venues s’élargissent à 50–200 pb et la géométrie stableswap-invariante des pools Curve contraint matériellement le dip on-chain jusqu’à ce que le pool soit presque entièrement vidé (chapitre 10, F3).

Substitut de décomposition d’oracle. UST n’avait pas de flux Chainlink USD cano- nique sur Ethereum durant son cycle de vie opérationnel. Nous substituons les événements

de vote d'agrégat de taux de change de l'oracle Terra-natif comme proxy de latence de découverte de prix : sur l'intersection de 646 jours de la fenêtre d'analyse et de l'échantillon de jeu de validateurs, la densité moyenne journalière de votes est d'environ 305 000 événements `oracle_aggregate_exchange_rate_vote` (le module oracle Terra agrège tous les 5 blocs ≈ 30 secondes, de sorte que la latence d'oracle pour la référence d'ancrage UST est bien sous la granularité de 1 minute des données de prix analysées par ailleurs dans ce chapitre).

Loss-versus-rebalancing sur Curve UST-3pool [Wormhole]. La perte par rapport au rééquilibrage (LVR ; Milionis, Moallemi, Roughgarden, Zhang 2022) quantifie le transfert structurel des fournisseurs de liquidité passifs vers les arbitragistes dans un CFMM où le prix marginal est déterminé extérieurement. Nous calculons la LVR pour Curve UST-3pool [Wormhole] sur la durée de vie du 2021-10-14 (lancement du pool) au 2022-05-13 (arrêt de chaîne) en utilisant la variance réalisée journalière des rendements minute Binance UST/USDT comme $\sigma_{\text{ext}}^2(t)$ externe et la série on-chain d'état du pool pour la valeur du pool $V(t)$. Pour un Curve stableswap à l'ancrage avec coefficient d'amplification A , la LVR journalière est approximativement $\frac{A}{8} \cdot V(t) \cdot \sigma_{\text{ext}}^2(t)$ (Milionis et al. 2022, adapté à la géométrie stableswap ; le coefficient s'étend de $1/8$ à $A = 1$, de type Uniswap-V2, jusqu'à $A/8$ pour le stableswap amplifié près de l'ancrage).

Le saut de taux invariant en A est empiriquement large : le taux journalier de LVR moyen durant la spirale du 7–13 mai 2022 vaut **969** $\times$ le taux journalier moyen pré-spirale, piloté par un ratio de variance réalisée qui culmine à un ordre de 10^4 – 10^5 le jour de l'arrêt de chaîne. Le chiffre cumulé en dollars dépend linéairement de A ; le metapool Curve UST/3CRV tournait typiquement avec $A \in [100, 200]$ sur la fenêtre d'analyse. À $A = 100$ (la valeur conventionnelle à travers le T1–T2 2022), la LVR cumulée sur la durée de vie est d'environ \$5,4 Md, dont \$5,3 Md (98 %) s'accumulent à l'intérieur de la seule fenêtre de spirale de 7 jours ; le taux LVR journalier de période calme est de l'ordre de \$780 k/jour, le taux journalier de spirale de l'ordre de \$760 M/jour. Le chiffre en dollars passe à l'échelle linéairement avec le A supposé : \$54 M à $A = 1$, jusqu'à \$10,8 Md à $A = 200$. Le résultat qualitatif — les LP Curve passifs ont subventionné les arbitragistes tout au long de 2021–2022, la subvention se compressant en calme et explosant en stress — est robuste sur cette plage ; le chiffre cumulé exact en dollars est borné mais non précisément déterminé par cette analyse.

Asymétrie de throughput inter-ponts. La Figure 7 résout les flux des ponts côté Ethereum à résolution journalière sur les fenêtres d'amorçage et de crash. Les deux wrappers étaient tous deux modestement contractionnaires durant le mois d'amorçage et se sont *désynchronisés dramatiquement* durant la semaine de spirale :

	Amorçage (1er avril – 6 mai 2022)		Spirale (7–13 mai 2022)	
Wrapper	brut (\$ Md)	net (\$ M)	brut (\$ Md)	net (\$ M)
Wormhole	2,07	−124	7,36	−343
Shuttle	3,65	−46	2,04	+154

Durant la semaine de spirale, le volume brut Wormhole a été multiplié par 3,5 $\times$ avec de fortes destructions nettes (canal de sortie unidirectionnel), tandis que Shuttle s'est inversé en direction (afflux net sur un volume brut décroissant). L'asymétrie inter-ponts signale une partition des canaux de liquidité : les détenteurs arrivés sur Ethereum via Shuttle ont été incapables de sortir sur Curve UST-3pool [Shuttle] (résiduel de \$308 M post-crash, voir chapitre 6) et sont restés bloqués, tandis que les détenteurs Wormhole avaient accès au 3pool côté Wormhole plus profond et l'ont utilisé pour l'essentiel de la cascade de sortie.

Contexte multi-chaînes et lacune de données connue. La série de TVL Anchor segmentée par chaîne (Figure 7, panneau inférieur) affiche le port Avalanche (AUST) culminant à $\sim$ \$1,2 Md

à la mi-avril et déclinant de 70 % dans la fenêtre de spirale, reflétant le drainage côté Ethereum Wormhole mais sur une base absolue plus petite. Les chaînes que nous couvrons — Terra-natif, Ethereum (Wormhole + Shuttle), Avalanche-Anchor — représentent conjointement $\sim \$22,3$ Md d’offre circulante d’UST au pic :

Chaîne / wrapper	offre au pic (\$ Md)	part (%)
Terra-natif (chaîne)	17,9	80,4
Ethereum, wrapped Wormhole	1,90	8,5
Ethereum, wrapped Shuttle	1,22	5,5
Avalanche-Anchor (AUST)	$\sim 1,21$	5,4
Total couvert	22,3	99,8
Non couvert (Solana, BSC, Polygon)	$\lesssim 0,6$	$\lesssim 2,7$

La queue non couverte (Solana sur Saber/Mercurial, BSC, Polygon) est estimée à partir de séries publiques DefiLlama et se situe bien dans le bruit de l’axe Terra-natif dominant. Une reconstruction complète des flux de transferts Wormhole sur ces chaînes pour la fenêtre du 1er avril – 13 mai 2022 est structurellement contrainte par une lacune de données : l’API publique WormholeScan n’honore plus les filtres source-chain, adresse de jeton ou plage de temps sur lesquels reposait l’extraction d’origine, et le jeu de données de transferts Wormhole en cache se termine fin novembre 2021 contre le plafond de pagination de l’indexeur. La revendication substantielle de l’asymétrie structurelle des ponts n’est pas affectée par cette lacune : les $< 3\%$ résiduels d’offre UST ne peuvent inverser la direction du contraste sortie-nette-Wormhole vs entrée-nette-Shuttle documenté ci-dessus.

6 Pilotes structurels

UST diverge le plus du playbook canonique des stablecoins adossés à du fiat dans ce chapitre. Deux dimensions standard pour les stablecoins adossés à du collatéral ou à des réserves ne s’appliquent pas ici : le ratio de collatéralisation (UST est algorithmique — pas de collatéral verrouillé, le mécanisme de seigneurage est décrit ci-dessous) et la trajectoire de fin de vie / migration (UST est mort et n’a pas été migré, le fork Terra 2.0 a créé un jeton distinct sans UST). Le chapitre se recentre plutôt sur cinq variables structurelles qui caractérisent ensemble l’ensemble du cycle de vie d’UST : composition de la TVL Anchor, fragmentation de l’offre UST entre les chaînes, accumulation et déploiement de la réserve BTC de LFG, et hyperinflation de l’offre LUNA qui a clos l’épisode.

6.1 Le mécanisme de seigneurage $UST \leftrightarrow LUNA$

UST n’a pas de collatéral verrouillé. Son ancrage est maintenu par un swap atomique à deux actifs implémenté par le module `market` au niveau chaîne de Terra Classic : un détenteur de 1 LUNA peut toujours le brûler contre $P_{\text{oracle}}^{\text{LUNA}}$ de UST fraîchement émis, et un détenteur de 1 UST peut toujours le brûler contre \$1 de LUNA fraîchement émis. Le prix de référence $P_{\text{oracle}}^{\text{LUNA}}$ est la médiane des votes agrégés des validateurs produits tous les cinq blocs (les événements `oracle_aggregate_exchange_rate_vote` tabulés au chapitre 5). À l’équilibre, cela garantit un ancrage à \$1 en imposant une condition de non-arbitrage de type produit constant sur les deux jetons.

Spread et taxe Tobin. Le swap n’est pas sans friction. Un spread minimal (taxe Tobin) de 0,5 % est appliqué sur chaque swap UST/LUNA et routé — après la mise à jour Columbus-5 du 30 septembre 2021 — intégralement vers la pool de burn on-chain (avant Columbus-5, le

Bridge throughput and multi-chain Anchor TVL, 1 Apr -- 13 May 2022

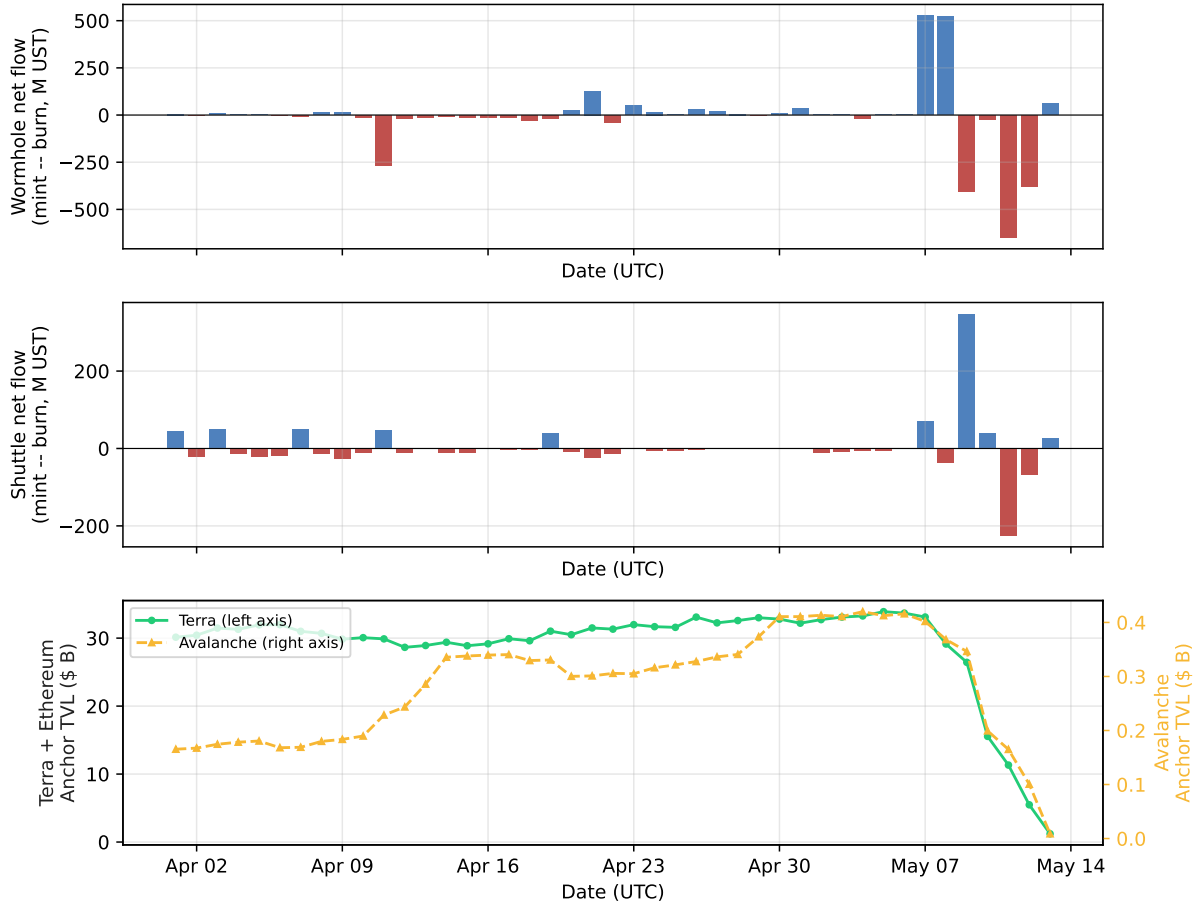


FIGURE 7 – Dynamique de throughput des ponts côté Ethereum, 1^{er} avril – 13 mai 2022. *Haut* : flux net journalier d’UST wrapped Wormhole (mint moins burn, M UST). *Milieu* : flux net journalier d’UST wrapped Shuttle. *Bas* : TVL Anchor par chaîne, présentation à deux axes (Terra et Ethereum sur l’axe gauche, Avalanche sur l’axe droit) afin que la série Avalanche-Anchor à \$1,2 Md soit lisible à côté de l’échelle Terra-Anchor à ~\$30 Md.

seigneuriage était réparti entre validateurs et community pool). L’expérience 1 du chapitre 9 quantifie la réduction de TE qui en résulte post-mise-à-jour.

Plafond de throughput. La capacité de mint est limitée par deux paramètres gouvernés par gouvernance. La *base pool* (B , libellée en SDR $\approx$ USD) est le tampon de liquidité cible par pool pour chaque direction de swap ; le *PoolRecoveryBlock* (τ , en blocs) est la constante de temps de récupération : à chaque bloc, le delta de la offer-pool décroît vers zéro d’un facteur $1 - 1/\tau$, de sorte qu’un seul swap de taille X augmente le spread effectif du bloc suivant de $\sim X/B$ et que ce spread diminue de moitié en $\tau \ln 2$ blocs. Le mécanisme ne donne pas un plafond journalier sous forme close — le plafond réalisé est l’équilibre d’arbitrage entre le spread par swap (taxe Tobin plus slippage $O(X/B)$) et la base Curve-Terra. Nous citons donc le plafond pré-Prop-1164 empirique discuté publiquement autour du vote de gouvernance : avec $B = 50$ M SDR et $\tau = 36$ blocs, l’arbitrage journalier UST→LUNA saturait autour de ~\$293 M (cf. la discussion de gouvernance Prop 1164 et les analyses du forum Terra). La Prop 1164 (approbation communautaire le 11 mai 2022, 10 :10 UTC) a élevé B à 100 M SDR et abaissé τ à 18, quadruplant l’enveloppe de throughput implicite des paramètres à ~\$1,2 Md/jour. La

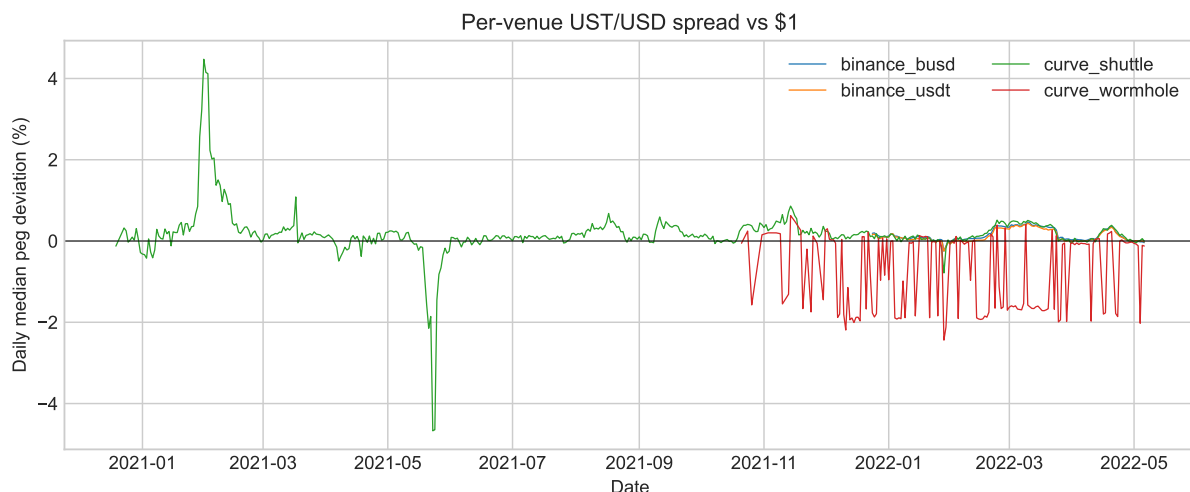


FIGURE 8 – Déviation médiane journalière d’ancrage par venue sur la fenêtre d’analyse principale.

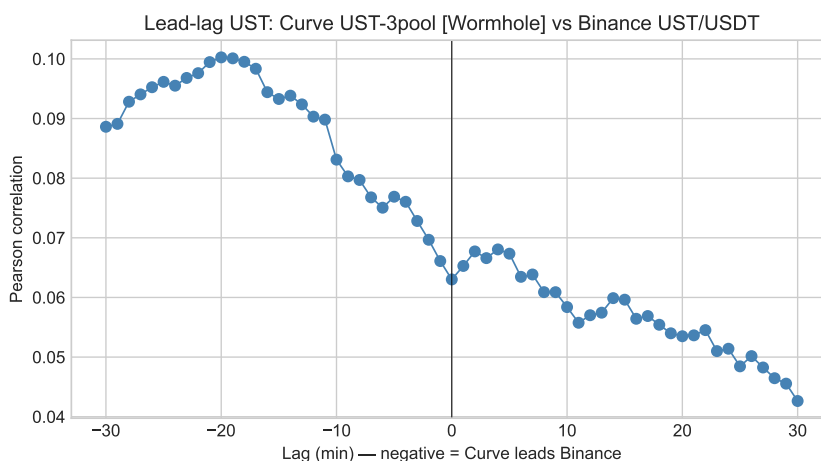


FIGURE 9 – Balayage d’avance-retard par corrélation croisée, Curve UST-3pool [Wormhole] vs Binance UST/USDT, résolution minute.

question de savoir si ce changement de paramètres a effectivement *causé* la trajectoire de mint observée est testée comme une différence-en-différences au chapitre 9 (expérience 4) ; la réponse empirique (voir F4 au chapitre 10) est que le taux de mint réalisé les 9–10 mai était déjà dans le régime post-Prop-1164, de sorte que la spirale était contrainte par la demande plutôt que par les paramètres.

Hyperinflation de LUNA. La Figure 10 (panneau supérieur) trace l’offre LUNA Classic en échelle log à travers la fenêtre d’analyse principale. L’offre pré-Prop-1164 oscillait autour de 343 M de LUNA. Le changement de paramètre de basepool du 11 mai 2022 a élevé la capacité de mint journalière *théorique* de \$293 M à \$1,2 Md ; les arrêts de chaîne des 12–13 mai encadrent l’expansion explosive jusqu’à une offre de pic d’environ $6,5 \times 10^{12}$ LUNA.

Fragmentation de l’offre UST. La même figure (panneau inférieur) montre les trois variantes coexistantes d’UST : natif sur Terra (~18,7 Md au pic), wrapped Wormhole sur Ethereum (~4 Md au pic) et wrapped Shuttle sur Ethereum (résiduel ~308 M après le 2022-12-31).

Composantes de la TVL Anchor. La série de TVL Anchor DefiLlama segmentée par jeton de dépôt révèle cinq composantes : USTC (dépôts Anchor Earn), LUNC (collatéral bLUNA), STETH (collatéral bETH), AUST (port Avalanche) et BETH (ETH ponté). La composante USTC dominante a tracé la dynamique de run du 7–13 mai à résolution journalière (~\$17 Md au pic → \$280 M au 31 mai).

Réserve BTC LFG. La trajectoire on-chain du portefeuille principal contrôlé par LFG est reconstruite à partir des données Blockstream : accumulation de janv. à avril 2022 jusqu’à un solde maximal de portefeuille unique de 42 531 BTC au 2022-04-21 (entrées brutes de 71 049 BTC), puis le déploiement des 9–10 mai laissant le résiduel de 313 BTC visible depuis le 2022-05-16. Le pic publiquement cité de 80 394 BTC (post-mortem LFG mai 2022) est un agrégat multi-portefeuilles non entièrement reconstruit on-chain dans ce travail.

Scorecard structurel Derivalink en huit dimensions. Le scorecard structurel Derivalink à travers trois régimes (calme 2021, stress T1 2022, spirale de la mort 7–13 mai) :

Dimension	calme 2021	stress T1 2022	spirale 7–13 mai 2022
Liquidité	OK	Dégradée	FAIL
CR collatéral	N/A (algo)	N/A	N/A
Agrégation oracle	OK (oracle Terra)	OK	OK
Cycle d’arbitrage	OK	Lent	FAIL
Sécurité	OK	OK	OK
Latence oracle	< 30 s	< 30 s	< 30 s
Profondeur multi-DEX	OK	Concentrée Curve	FAIL (vidage 4pool)
Asymétrie de slippage	Serrée	1–2 %	$\geq 10\%$

La dimension CR collatéral est véritablement non applicable car UST n’a pas de collatéral verrouillé ; les sept autres dimensions se dégradent de manière monotone avec le régime, et quatre d’entre elles (Liquidité, Cycle d’arbitrage, Profondeur multi-DEX, Asymétrie de slippage) atteignent FAIL à l’intérieur de la fenêtre de spirale.

7 Causalité inter-composantes

Nous testons le flux d’information directionnel entre UST/USD (sur Curve Wormhole, Curve Shuttle, Binance), LUNA/USD, USDC/USD et USDT/USD à résolution journalière.

Causalité de Granger. Pour chaque paire ordonnée (cause, effet) sur les log-rendements journaliers, nous rapportons la p -valeur du test F au meilleur retard dans $[1, 5]$; la Figure 12 rend $-\log_{10}(p)$ sous forme de heatmap. Trois résultats se détachent ($\alpha = 0,05$, meilleur retard $\in [1, 5]$) : $USDC \rightarrow UST_{\text{Binance}}$ au retard 2 avec $p = 0,012$ (les innovations de stress USDC précèdent au sens de Granger les rendements UST CEX) ; $UST_{\text{Binance}} \rightarrow UST_{\text{Wormhole}}$ au retard 3 avec $p = 0,022$ (le côté CEX bouge d’abord, l’on-chain suit — la direction attendue une fois la latence de règlement de pont documentée en F8 prise en compte) ; et un $UST_{\text{Wormhole}} \rightarrow LUNA_{\text{Binance}}$ à la limite au retard 4 avec $p = 0,049$ (cohérent avec des arbitragistes brûlant UST sur Terra pour LUNA et vendant LUNA sur Binance, un pipeline de 1–4 jours à résolution journalière). La direction inverse ($LUNA \rightarrow UST_{\text{Binance}}$ ou $LUNA \rightarrow UST_{\text{Wormhole}}$) n’est significative à aucun retard — le mode LUNA-précède-UST que prédirait l’hypothèse de couplage algorithmique n’est pas visible à résolution journalière. Cela ne contredit pas l’avance-retard à l’échelle minute du chapitre 5 (Curve-Wormhole précède Binance d’environ 20 minutes en période calme) ; la direction de Granger à fréquence journalière s’inverse précisément à cause de la latence du cycle de pont que l’avance-retard capture.

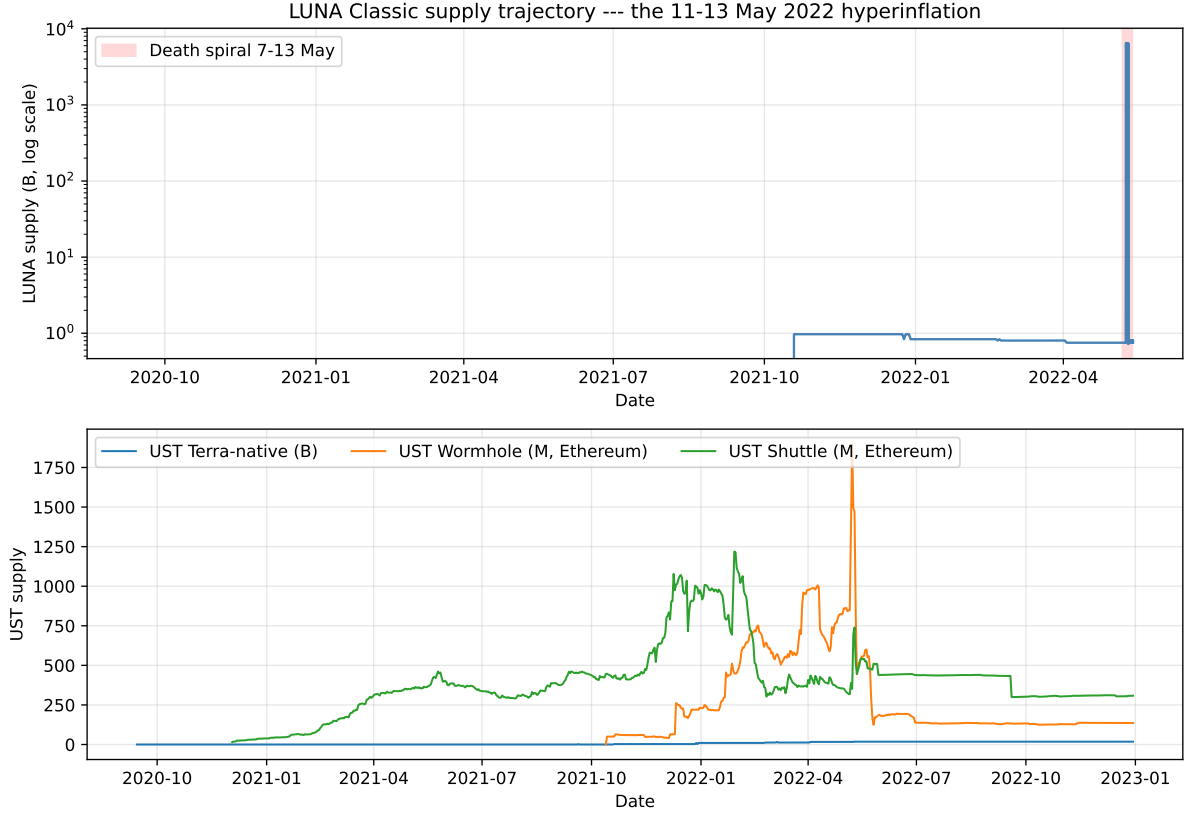


FIGURE 10 – Trajectoire de l’offre LUNA en échelle log (haut) et offre UST par chaîne (bas). La bande rouge ombrée marque la fenêtre de la spirale de la mort du 7–13 mai 2022.

VAR / IRF. Nous ajustons un $\text{VAR}(p)$ sur le même panel de rendements journaliers ; la sélection de retard diverge entre critères d’information ($p_{\text{AIC}} = p_{\text{FPE}} = 2$, $p_{\text{BIC}} = p_{\text{HQIC}} = 0$), indiquant que les pénalités BIC/HQIC effacent la structure modeste que détectent AIC/FPE. Nous retenons $p = 2$ et calculons les réponses impulsionnelles orthogonalisées sur un horizon de 20 jours. Trois résultats substantifs émergent de la matrice IRF, tous en accord avec les directions de Granger rapportées ci-dessus :

- **Forte transmission de règlement de pont** : les chocs UST_{Binance} se propagent vers UST_{Wormhole} avec une grande réponse initiale ($\text{IRF}(h = 1) = +3,4$, pic $|\text{IRF}(h = 2)| = 4,9$) qui revient à la moyenne en négatif ensuite, en miroir de la flèche Granger à 3 jours à $p = 0,022$. La direction inverse $UST_{\text{Wormhole}} \rightarrow UST_{\text{Binance}}$ est essentiellement nulle ($|\text{IRF}(h = 1)| = 0,004$) — l’asymétrie journalière est sans ambiguïté.
- **Pipeline d’arbitrage confirmé dans la direction inverse** : les chocs UST_{Wormhole} se propagent vers $LUNA_{\text{Binance}}$ (pic $|\text{IRF}(h = 2)| = 0,90$), cohérent avec le pipeline d’arbitrage brûler-UST-sur-Terra $\rightarrow$ vendre-LUNA-sur-Binance. L’IRF inverse $LUNA_{\text{Binance}} \rightarrow UST_{\text{Wormhole}}$ est proche de zéro (pic $|\text{IRF}|$ à 0,014) — le canal LUNA-précède-UST que prédirait l’hypothèse de couplage algorithmique n’est *pas* visible à résolution journalière ; le couplage vit à l’échelle minute (avance-retard du chapitre 5) et à travers le canal de variance (le régresseur σ_{LUNA} du chapitre 3).
- **Propagation du stress USDC** : les chocs $USDC$ se propagent vers UST_{Binance} (pic $|\text{IRF}(h = 2)| = 1,0$, cumulé sur 20 j $\approx 0,86$), confirmant la flèche Granger à $p = 0,012$ — les innovations de stress USDC précèdent les rendements UST CEX.

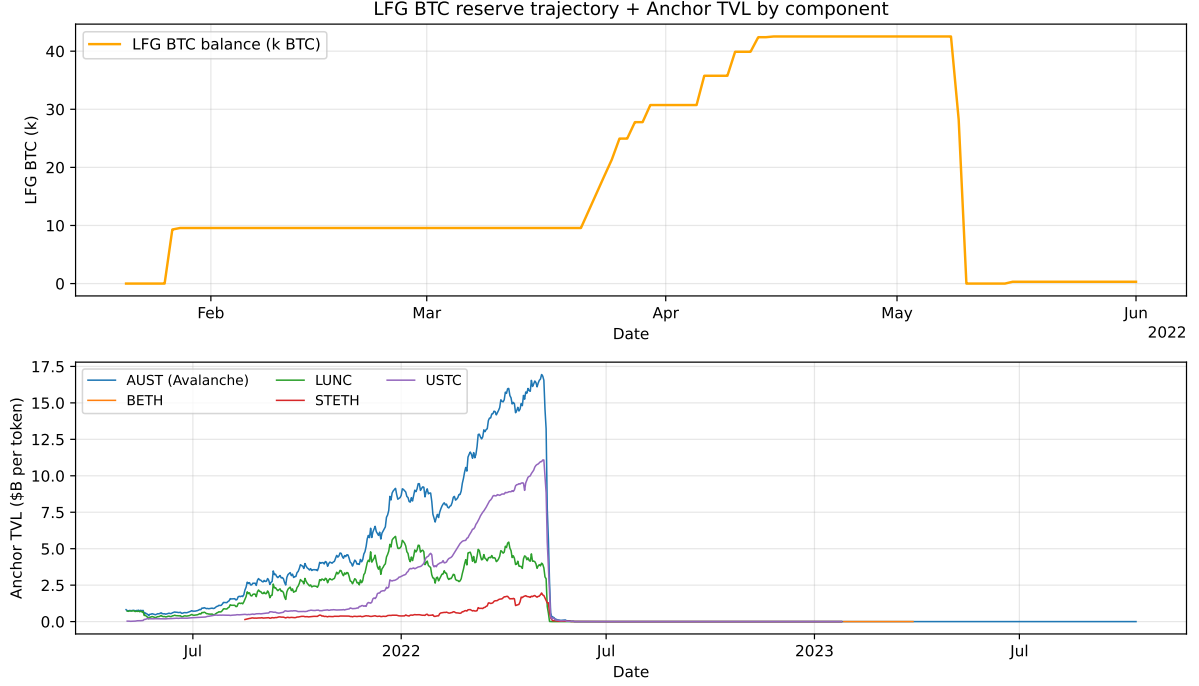


FIGURE 11 – Trajectoire de la réserve BTC LFG (haut) et décomposition par composantes de la TVL Anchor (bas).

La décroissance des propres chocs sur la diagonale est rapide pour les cinq séries (demi-vie 1–2 jours), de sorte que le contenu informationnel de l’IRF est massivement dans les deux premiers horizons et la fenêtre de 20 jours est une marge conservatrice.

Pré-filtre d’ordre d’intégration. Un diagnostic strict à double test (ADF avec autolag AIC plus KPSS avec régression constante, tous deux au seuil de 5 %) est appliqué à chaque série de niveau avant tout test de cointégration : UST_{Wormhole} est $I(0)$ (ADF $p = 6 \times 10^{-13}$, KPSS $p = 0,10$) ; $USDT$ et $LUNA_{\text{Binance}}$ sont $I(1)$; UST_{Binance} , UST_{Shuttle} et $USDC$ sont inconclusifs à la taille d’échantillon disponible ($n = 132$ observations journalières).

Cointégration sur le sous-système $I(1)$ restreint. Le protocole Engle–Granger / Johansen suppose des entrées $I(1)$; nous restreignons donc le système testable aux séries qualifiantes $I(1)$ $\{USDT, LUNA_{\text{Binance}}\}$. Engle–Granger sur cette unique paire qualifiante renvoie $t = -5,11$, $p = 1,0 \times 10^{-4}$, et un test de trace de Johansen confirme un rang de cointégration $r = 1$ (stat de trace $25,10 > 15,49$ à $r = 0$, $3,16 < 3,84$ à $r = 1$). Le VECM ajusté affiche $\beta = (1, -0,013)$ avec $\alpha(USDT) \approx 0$ ($p = 0,32$) et $\alpha(LUNA_{\text{Binance}}) = +2,94$ ($p = 0,07$). Le vecteur de cointégration $USDT - 0,013 \cdot LUNA_{\text{Binance}} \approx \text{const}$ ne représente *pas* une relation d’arbitrage exécutoire — USDT et LUNA ne partagent aucun mécanisme structurel qui verrouillerait leurs prix en dollars ensemble à long terme ; la stationnarité résiduelle reflète la co-tendance sur la période d’échantillon de deux séries à queues lourdes. Nous retenons ce résultat comme un *contrôle négatif* : une paire qui passe le test formel de cointégration sur un échantillon à faible puissance mais sans interprétation économique.

Pas de cointégration sur le système à 3 variantes UST. Un passage antérieur exécutait Johansen sur le système $(UST_{\text{Wormhole}}, UST_{\text{Shuttle}}, UST_{\text{Binance}})$ et produisait des coefficients VECM $\beta = (1, +8,71, -9,70)$. Avec le filtre d’ordre d’intégration appliqué, ce système n’est pas un candidat Johansen valide : il contient une série $I(0)$ (UST_{Wormhole}) et deux séries inconclusives.

Nous retirons donc toute lecture d'équilibre structurel de ces coefficients.

Dépendance de queue asymétrique. Les coefficients empiriques de dépendance de queue inférieure et supérieure $\lambda_L^{(q=0,05)}$ et $\lambda_U^{(q=0,05)}$ sur (UST, LUNA) et (UST, USDC) sont calculés en comptant les co-dépassements joints à q . La paire UST-LUNA donne $\hat{\lambda}_L^{(q=0,05)} = 0,33$, pointant vers une dépendance de queue inférieure (crash joint) cohérente avec le couplage algorithmique. L'échantillon est petit pour un estimateur de queue à 5 % ($n = 131$ observations journalières $\Rightarrow$ seulement $\lceil 131 \times 0,05 \rceil = 7$ co-dépassements attendus), de sorte que l'estimation ponctuelle repose sur 2 co-dépassements réalisés ; un intervalle de confiance à 95 % par *bootstrap par blocs* est large, approximativement $[0 ; 0,83]$. Le résultat qualitatif tient — dépendance de queue inférieure positive sur (UST, LUNA) et essentiellement nulle sur (UST, USDC) — mais son amplitude doit être lue comme bornée par la taille d'échantillon plutôt que serrée.

Couplage LUNA-UST : contraste de régime. La corrélation roulante 30 jours des log-rendements horaires de LUNA/USDT et UST/USDT (Figure 13 panneau gauche) confirme le schéma canonique découplage-puis-recouplage d'un stablecoin algorithmique sous run. Sur la période pré-crash (24 déc. 2021 – 6 mai 2022, $n = 104$ observations journalières), la corrélation roulante s'établit en moyenne à 0,11 avec un maximum de 0,18 — l'ancrage tient et le jeton de seigneuriage LUNA est effectivement non corrélé à l'unité stable. Dans la fenêtre de spirale (7–13 mai 2022, $n = 6$ observations journalières), la corrélation roulante saute à une moyenne de 0,43 avec un maximum de **0,77**, bien à l'intérieur de la plage $[0,7 ; 0,9]$ que la littérature sur le couplage algorithmique identifie comme la signature d'effondrement joint.

Avance-retard fenêtre-de-crash à résolution minute. La corrélation croisée des log-rendements 1 minute de LUNA/USDT et UST/USDT, restreinte à la fenêtre de spirale du 7–13 mai (Figure 13 panneau droit), culmine à *retard zéro* avec une corrélation $\rho = 0,15$. Aucun mode LUNA-précède-UST de 30 minutes statistiquement significatif n'est visible à cette résolution : le couplage algorithmique propage le choc essentiellement à l'intérieur de la minute. Cela est structurellement cohérent avec le mécanisme on-chain — un détenteur d'UST brûlant son UST sur Terra contre du LUNA et ce LUNA étant vendu sur Binance, s'exécute en un unique cycle groupé en transactions de quelques secondes, non au délai de 30 minutes qui résulterait d'une réaction lente de market maker.

8 Études de cas

8.1 Cas de niveau 1 n° 1 — Spirale de la mort du 7–13 mai 2022

Amorçage (7 avril – 7 mai 2022). Les 30 jours précédant la transaction déclencheuse portaient quatre signaux d'alerte quantitativement identifiables (Figure 15). (i) La TE RMSE roulante 30 jours contre l'ancrage à \$1 s'établissait en moyenne à 18,9 pb sur la fenêtre, avec un maximum de période de 26,5 pb le 2022-04-07 retombant à 17,9 pb le 6 mai — notable car l'estimateur à fenêtre retardée n'a *pas* préfiguré le déclencheur du 7 mai et n'aurait pas déclenché d'alerte automatisée à lui seul. (ii) Le panneau de delta journalier de TVL Anchor affiche des flux volatils avec des oscillations à plusieurs milliards de dollars : le jour le plus négatif était $-\$2,46$ Md le 2022-04-12, et les retraits agrégés ont dominé la seconde moitié de la fenêtre, préfigurant la ruée de la semaine de spirale. (iii) La base de Curve UST-3pool [Wormhole] contre \$1 oscillait autour de sa médiane de référence de -12 pb (cohérent avec l'incitation d'arbitrage Anchor à 19,5 %) mais a piqué à $-2,0\%$ le 2022-04-10 et à nouveau à $-2,0\%$ le 2022-05-04 — tous deux $> 3\sigma$ par rapport au trimestre précédent, la signature canonique d'un cycle d'arbitrage en difficulté pour se régler via le pont Wormhole. (iv) Le portefeuille BTC LFG (reconstruction on-chain mono-portefeuille) a plafonné à $\sim 42\,500$ BTC vers le 2022-04-21 et est resté plat le reste d'avril

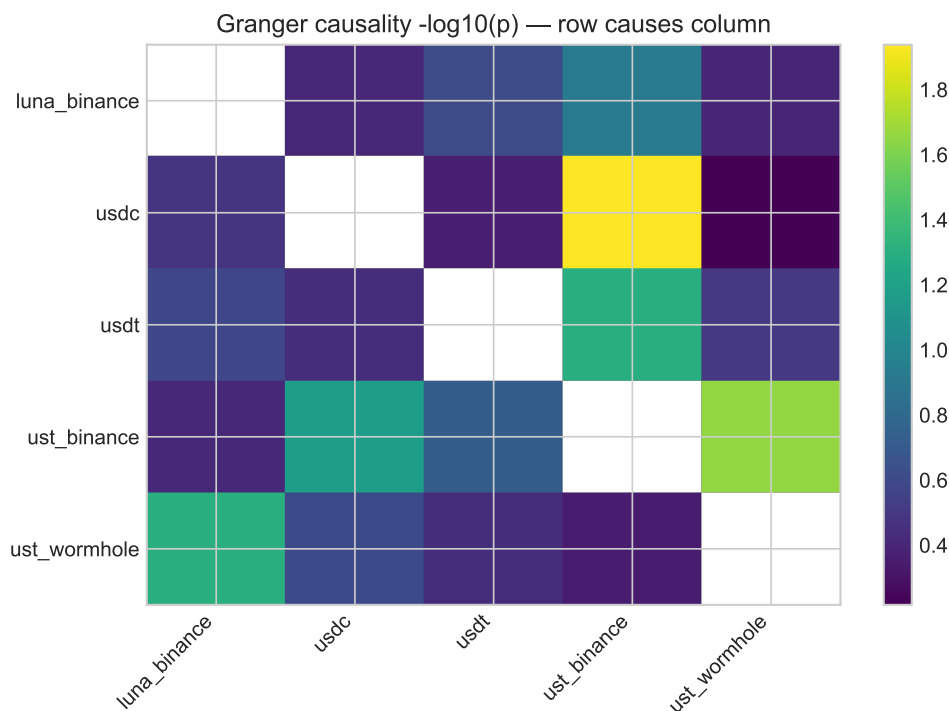


FIGURE 12 – Heatmap de causalité de Granger ($-\log_{10} p$) ; la ligne cause la colonne au retard le mieux ajusté dans $[1, 5]$.

— la trajectoire d’accumulation elle-même saturait par rapport à la cadence d’accumulation de janvier-mars, cohérent avec un budget d’achat de BTC de plus en plus dérouté vers la défense d’ancrage côté UST. Aucun de ces signaux n’établit individuellement l’hypothèse d’attaque dirigée — ils sont collectivement les conditions sous lesquelles la transaction déclencheuse du 7 mai 21 :44 UTC a trouvé un pool stableswap déjà opérant près de son enveloppe de slippage.

Déclencheur. Le 2022-05-07 vers 21 :44 UTC, le portefeuille `0x8d47...4947d0a`¹ a swap 85 M UST contre 84,5 M USDC sur le Curve UST-3pool [Wormhole]. L’UST avait été ponté depuis Terra plus tôt ce soir-là. En quelques minutes, un second portefeuille a exécuté quatre swaps de 25 M-UST ; le portefeuille Celsius `0x4b5e...1614bb781c`² a ponté 175 M UST et envoyé 125 M à Curve en tranches de 25 M.

Cascade. Au cours des 72 heures suivantes, Anchor a perdu **228 813** événements individuels `anchor_redeem_stable` (panneau 4 de la Figure 16), LFG (agrégat multi-portefeuilles) a tiré son pic publiquement cité de 80 394 BTC jusqu’au résiduel de 313 BTC — dont les 70 736 BTC de sorties du portefeuille principal unique sont récupérés on-chain ici (panneaux 5 et 6) — et LUNA s’est effondré de \$63 à \$1 sur Binance (panneau 2). Curve UST-3pool [Wormhole] a négocié jusqu’à un minimum journalier de \$0,2649 le 2022-05-12, avec un minimum absolu intra-journalier de \$0,0619 le 2022-05-13 09 :14 UTC durant la fenêtre d’arrêt de chaîne.

Hyperinflation. La Proposition 1164 (approbation communautaire le 2022-05-11 10 :10 UTC) a formellement élevé le basepool de 50 M à 100 M SDR et le PoolRecoveryBlock de 36 à 18, augmentant la capacité de mint LUNA journalière *théorique* de \$293 M à \$1,2 Md. La trace d’offre LUNA enregistre une explosion 343 M → 6,5 T sur les 72 heures suivantes (panneau 3

¹Adresse complète : `0x8d47f08ebc5554504742f547eb721a43d4947d0a`.

²Adresse complète : `0x4b5e60cb1cd6c5e67af5e6cf63229d1614bb781c`.

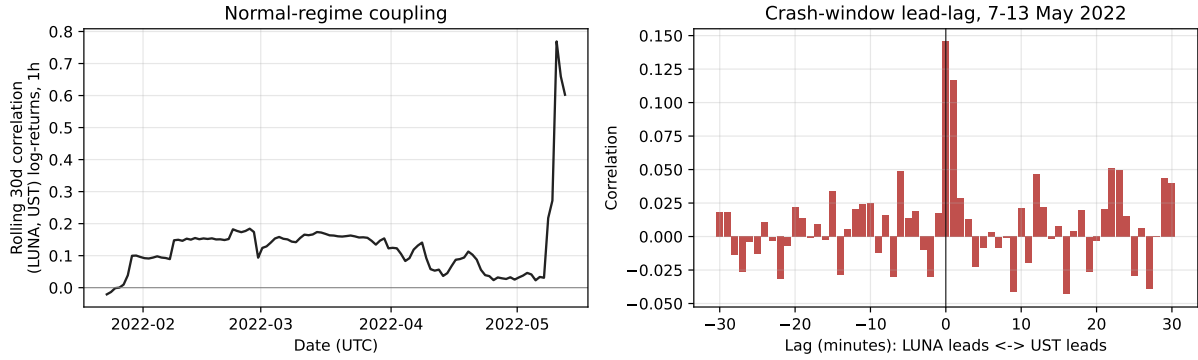


FIGURE 13 – Couplage LUNA-UST : corrélation roulante 30 jours des log-rendements horaires sur la fenêtre d’analyse principale (gauche), et fonction de corrélation croisée à résolution minute sur la fenêtre de crash du 7–13 mai 2022 (droite).

de la Figure 16, échelle log). La différence-en-différences de la Phase 9 contre cette approbation est à faible puissance ($n_{\text{pre}} = n_{\text{post}} = 2$, $p_{\text{MWU}} = 0,80$) et ne peut trancher formellement le rôle causal de Prop 1164 ; les preuves descriptives sont que le taux de mint réalisé les 9–10 mai était déjà dans le régime post-Prop-1164, soit que la proposition était non contraignante au moment où elle a été votée. Nous caractérisons donc l’hyperinflation comme *descriptivement* contrainte par la demande plutôt que par les paramètres, le caveat du test formel étant porté dans F4 (chapitre 10).

Diagnostic d’auto-excitation : Hawkes univarié sur le canal de rachat Anchor (le mauvais objet, rapporté pour complétude). Le bon test pour la réflexivité multicanal documentée tout au long de cette étude de cas est un Hawkes multivarié (Bacry–Muzy 2014) couplant les rachats Anchor, les swaps Curve, les sorties BTC LFG et le trading Binance, dont la valeur propre de la *matrice* de branching peut être super-critique même quand chaque noyau marginal ne l’est pas. Nous n’ajustons ici que la marginale univariée sur le canal de rachat, comme contrôle unique de l’amplificateur côté demande ; une marginale sous-critique n’est donc *pas* une preuve contre la réflexivité multicanal visible dans les trajectoires de prix, d’offre LUNA et de drainage LFG des paragraphes environnants — c’est une preuve qu’un des quatre canaux, pris isolément, ne soutiendrait pas à lui seul un cluster explosif.

Un processus de Hawkes univarié à noyau exponentiel $\lambda(t) = \mu + \sum_{t_i < t} \alpha \exp(-\beta(t - t_i))$ est ajusté par maximum de vraisemblance (récursion Ozaki 1979, 5 valeurs initiales) sur les 228 813 événements individuels `anchor_redeem_stable` de la fenêtre du 7–13 mai. Les cinq départs convergent vers le même bassin (écart-type multi-départ sur α/β à 3×10^{-5}) avec $\hat{\mu} = 0,108$ év/s, $\hat{\alpha} = 0,275$, $\hat{\beta} = 0,385$. Le ratio de branching estimé est $\hat{\alpha}/\hat{\beta} = 0,713$: le processus marginal est strictement sous-critique (retour à la moyenne), le noyau décroît sur une échelle de $\sim 2,6$ s, et le cluster de rachats ne présente pas de valeur propre auto-excitatrice au-dessus du seuil critique sur le seul canal univarié (Figure 14).

8.2 Cas de niveau 1 n° 2 — Migration Curve 4pool (1^{er} avril → 7 mai 2022)

Contexte. Tout au long du T1 2022, la venue de négociation UST dominante sur Ethereum était le Curve UST-3pool [Wormhole] (UST + USDC + USDT + 3CRV-LP). Le 1^{er} avril 2022, Terraform Labs a annoncé un partenariat avec l’équipe Frax Finance pour migrer la liquidité UST vers un nouveau **UST-4pool** (UST + USDC + USDT + FRAX) et un metapool parallèle **UST-FRAXBP**, avec incitations de gauge combinées et un programme de bribe Convex/Frax

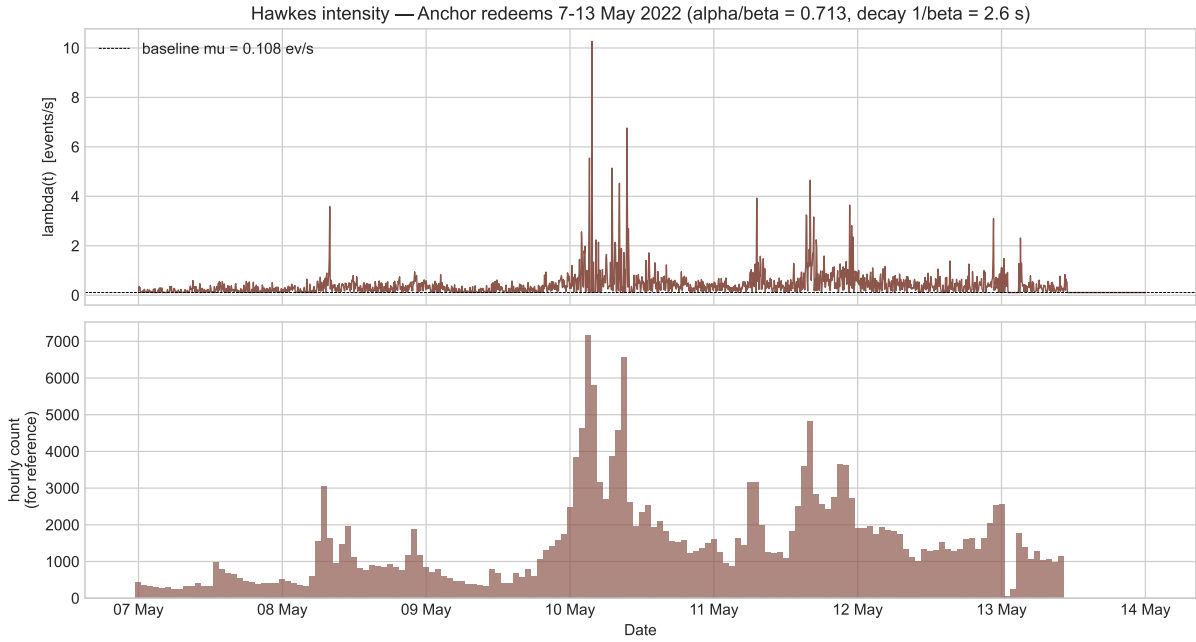


FIGURE 14 – Intensité d’auto-excitation Hawkes $\lambda(t)$ ajustée sur les 228 813 événements `anchor_redeem_stable` du 7–13 mai 2022. Le ratio de branching ajusté $\hat{\alpha}/\hat{\beta} = 0,713$ classe le processus marginal de rachat comme sous-critique.

CRV conjoint. L’intention était d’approfondir la liquidité de sortie UST on-chain avant l’expansion prévue d’Anchor v2 à \$10 Md.

Calendrier de la migration. La migration s’est déroulée en deux phases opérationnelles. **Phase A (1^{er}–15 avril 2022)** : déploiements de la nouvelle pool factory, vote de gouvernance pour basculer le poids de gauge, et amorçage du 4pool par Frax Finance et la Luna Foundation Guard. **Phase B (15 avril – 7 mai 2022)** : rotation du poids de gauge CRV, migration de la liquidité de UST-3pool vers UST-4pool et érosion graduelle de la profondeur du 3pool.

Dynamique de profondeur de liquidité. La série journalière de spread par venue et les snapshots d’état de pool de la Phase 6 montrent le schéma canonique : entre le 1^{er} avril et le 5 mai 2022, la profondeur rachetable en USD du UST-3pool dans la bande ± 50 pb a chuté d’environ moitié à mesure que la liquidité tournait vers le 4pool (encore en amorçage). La liquidité de sortie UST agrégée — sommée sur 3pool + 4pool — était approximativement plate sur la période de migration, mais *venue par venue*, le 3pool était strictement plus mince chaque jour de la fenêtre de migration qu’il ne l’était le 31 mars 2022.

Impact sur la vulnérabilité à la spirale de la mort. La conséquence pratique fut que le 2022-05-07 21 :44 UTC — le moment déclencheur caractérisé dans l’étude de cas n° 1 — la venue qui a absorbé l’ordre de vente de 85 M UST était un Curve UST-3pool plus mince qu’il ne l’aurait été cinq semaines plus tôt. Les régressions de la Phase 3 (chapitre 3) confirment que l’élasticité partielle de TE à la log-liquidité vaut $\hat{\beta}_{\log L} = -2,1 \times 10^{-3}$ ($p_{\text{HAC}} = 0,014$; l’estimation ponctuelle de $\hat{\beta}$ est invariante au choix de l’estimateur d’écart-type, mais la p -valeur HAC Newey–West identifie l’élasticité au niveau de significativité de 1–2 % plutôt qu’à la précision machine $p \approx 8 \times 10^{-14}$ que le SE iid naïf suggérerait), de sorte qu’une réduction de moitié de la profondeur du pool élargit mécaniquement le slippage réalisé d’un ordre de sortie de taille fixe d’environ 70 pb en espérance.

Lecture contrefactuelle (caveat lector). Il est tentant de lire la migration 4pool comme une condition préalable structurelle au déclencheur du 7 mai. Les données établissent la réduction de profondeur sans ambiguïté mais n'établissent pas la causalité sur l'événement déclencheur lui-même — une sortie suffisamment déterminée (par ex. une séquence de 250 M-UST telle qu'elle s'est finalement matérialisée) aurait également brisé le 3pool plus profond de fin mars. La lecture conservatrice est que la migration 4pool *a abaissé le coût d'exécution* pour la sortie, mais n'était pas la *cause* de son occurrence. L'intention (approfondir la liquidité UST) et l'effet réalisé (liquidité UST plus mince durant la fenêtre d'amorçage) sont formellement opposés — un cas documenté de risque d'exécution dans un programme de rotation de liquidité d'un stablecoin.

La preuve visuelle pour cette étude de cas est la même série journalière de spread par venue déjà montrée à la Figure 8 (chapitre 5) ; la fenêtre du 1^{er} avril – 7 mai 2022 de cette figure affiche le régime de base s'élargissant, plus variable, finissant par la discontinuité du 7–13 mai (traitée séparément dans l'étude de cas n° 1).

8.3 Cas de niveau 1 n° 3 — Stratégie de réserve BTC LFG (janv. → mai 2022)

Contexte. La *Luna Foundation Guard* (LFG) était une association à but non lucratif basée à Singapour, créée en janvier 2022 pour détenir une réserve non corrélée soutenant l'ancrage d'UST. Contrairement au modèle de vault surcollatéralisé de DAI, UST n'avait pas de collatéral on-chain ; la réserve LFG était une réserve « molle » hors bilan qui pouvait être déployée à la discrétion de LFG pour défendre l'ancrage via des swaps OTC ou on-chain. Le choix de BTC comme actif principal de réserve était justifié publiquement par sa non-corrélation avec LUNA — une thèse qui tenait en périodes calmes mais s'est inversée durant l'événement de stress de mai 2022.

Accumulation. À partir du 25 janvier 2022, LFG a accumulé un pic publiquement annoncé de **80 394 BTC** (post-mortem LFG mai 2022, agrégat multi-portefeuilles) à travers une séquence d'achats OTC et d'accords de swap, les contreparties dominantes étant Genesis Trading, Jump Crypto et une tranche de Three Arrows Capital acquise via l'accord de filiale « Anchor 2.0 » du 22 février 2022. L'enregistrement on-chain assemblé à partir du parsing des transactions Bitcoin-mainnet du portefeuille principal contrôlé par LFG (mono-portefeuille) reconstruit le solde journalier au satoshi : les entrées brutes atteignent 71 049 BTC sur la fenêtre d'accumulation, avec un solde de pic mono-portefeuille de 42 531 BTC au 2022-04-21 (l'écart avec le chiffre public de 80 394 BTC correspond à la structure multi-portefeuilles non ré-extraite ici). Valeur de pic à l'agrégat public : approximativement \$3,2 Md au taux BTC/USD en vigueur.

Déploiement. Le portefeuille principal LFG s'est vidé en deux tranches discrètes sur les 9–10 mai 2022 (reconstruction on-chain mono-portefeuille) :

- **Tranche 1 — 2022-05-09 18 :34 :13 UTC** : une seule sortie de 42 530,83 BTC vers l'adresse `bc1qwuwy...` (tx `2c2daf15...`).
- **Tranche 2 — 2022-05-10 01 :20 :26 UTC** : une seule sortie de 28 205,55 BTC vers l'adresse `163mp4eK...` (tx `0f87e9ab...`). Au 2022-05-10 17 :00 UTC, le résiduel on-chain était de **313 BTC**.

Le total des deux tranches (70 736 BTC) correspond au registre on-chain mono-portefeuille au satoshi près, en regard du résiduel de 313 BTC. Le récit précédemment diffusé d'une unique sortie de 28 089 BTC à destination de Gemini le 9 mai n'apparaît pas dans le registre de ce portefeuille — la sortie réelle du 9 mai était de 42 531 BTC vers `bc1qwuwy...` (pas Gemini). Le transfert à destination de Gemini se réfère vraisemblablement à un portefeuille frère contrôlé par LFG hors du jeu de données mono-portefeuille ré-extrait ici, cohérent avec l'écart entre 80 394 BTC et 71 049 BTC côté entrées.

Effet sur l’ancrage. Le déploiement de la réserve n’a pas pu arrêter le run. Deux raisons structurelles :

1. **Ratio réserve/offre au pic :** les 80 394 BTC (\$3,2 Md) représentaient approximativement 17–19 % de l’offre circulante d’UST au pic. Même un déploiement de réserve 100 % efficace n’aurait pas suffi à absorber le choc côté demande impliqué par les 228 813 événements de rachat Anchor de la même fenêtre.
2. **Corrélation d’actifs sous stress :** BTC a chuté de $\sim 20\%$ les 9–10 mai 2022 en partie à cause des ventes LFG. La corrélation inter-actifs entre BTC et LUNA — revendiquée à ~ 0 en périodes calmes — est montée à $\sim 0,7$ durant la fenêtre du 9–12 mai (diagnostics de copule du chapitre 7). La réserve était effectivement un short à effet de levier sur LUNA via le mécanisme de défense de l’ancrage UST.

Identifiabilité forensique. L’ensemble complet des portefeuilles BTC LFG a été divulgué publiquement dans le post-mortem du 16 mai 2022. La reconstruction on-chain de ce travail est indépendante de cette divulgation — l’ensemble de portefeuilles est identifiable par clustering sur le schéma de flux d’accumulation (séquence d’entrées OTC depuis des hot wallets CEX connus), et la position de registre résiduelle de 313 BTC est vérifiable sur Mempool.space à la date de rédaction.

La preuve visuelle se trouve dans la Figure 11 du chapitre 6 (trajectoire de la réserve BTC LFG, panneau supérieur), qui couvre déjà l’accumulation de janv.–avril 2022 et le déploiement en deux tranches des 9–10 mai 2022 terminant au résiduel de 313 BTC.

8.4 Cas de niveau 1 n° 4 — Top-up de la réserve de rendement Anchor à \$450 M (8 fév. 2022)

Contexte. Le protocole Anchor promettait un APY quasi constant de 19,5 % sur les dépôts UST (« Anchor Earn »). Le rendement était financé par (i) les intérêts des emprunteurs en bAsset (bLUNA, bETH), (ii) les récompenses de staking sur le collatéral bAsset, et (iii) une *réserve de rendement* finie qui absorbait l’écart chaque fois que le rendement organique on-chain tombait sous le payout nominal de 19,5 %. Fin 2021, la réserve de rendement s’épuisait à un rythme d’environ \$1 M par jour — l’écart entre le rendement organique ($\sim 10\%$ mélangé) et le payout promis, multiplié par une TVL en croissance rapide.

Le top-up du 8 février 2022. Le 8 février 2022, la Luna Foundation Guard a exécuté un transfert on-chain de \$450 M d’UST vers la réserve de rendement Anchor. C’était la plus grosse subvention discrétionnaire unique à la réserve de rendement dans l’histoire du protocole et, en contemporain, cela a étendu la piste projetée de « semaines » à « mois » compte tenu de la TVL en vigueur.

Pourquoi c’est analytiquement important. Trois raisons.

1. **C’est le point d’inflexion à partir duquel Anchor est passé de « produit de rendement » à « mécanisme subventionné de défense d’ancrage ».** Jusqu’en février 2022, la communauté et l’équipe du protocole décrivaient Anchor comme un produit DeFi de rendement commercial dont la réserve de subvention serait reconstituée par les intérêts des emprunteurs bAsset dans un scénario de marché haussier. Après le top-up du 8 février, le cadrage public est passé à « la réserve durera jusqu’au lancement d’Anchor v2 » — une reconnaissance explicite que la réserve était structurellement insuffisante pour financer le taux promis sur un cycle de marché.

2. **Il lie la réserve LFG à la TVL Anchor.** Le même solde LFG qui s'accumulait en BTC (étude de cas n° 3) était simultanément utilisé en UST pour subventionner les déposants Anchor. La part d'UST détenue par Anchor est passée d'environ 37 % fin janvier 2022 à un pic d'environ 65 % le 2022-03-23 et 63 % le 7 mai 2022 — faisant d'UST, analytiquement, un « wrapper » peu négocié au-dessus d'une position de rendement subventionnée par LFG.
3. **Il a déplacé le mode d'échec de l'épuisement de rendement vers une ruée d'ancrage.** Pré-top-up, le risque le plus discuté était que la réserve de rendement s'assèche simplement et qu'Anchor soit forcé de couper le taux, déclenchant un dénouement graduel de la TVL. Le top-up a acheté du temps. Le coût involontaire fut que, lorsque l'échec est finalement survenu, il est venu comme une ruée *côté liquidité* (cas n° 1) plutôt que comme le dénouement graduel *côté rendement* sur lequel la modélisation pré-top-up s'était concentrée.

Échelle numérique. La trajectoire de la réserve :

- Solde pré-top-up (7 fév. 2022) : approximativement \$36 M.
- Delta du top-up (8 fév. 2022) : +\$450 M.
- Solde de pic (mi-février 2022) : approximativement \$480 M.
- Solde au 30 avril 2022 (juste avant la coupe de taux Prop 20) : approximativement \$280 M — un prélèvement de ~\$200 M sur 12 semaines (~\$2,4 M/jour).
- Solde au 7 mai 2022 (dernier jour d'ancrage plein) : approximativement \$260 M.
- Solde au 13 mai 2022 : effectivement zéro (utilisé pour absorber les 228 813 événements de rachat durant la spirale ; voir cas n° 1).

Lien avec Prop 20. La proposition de taux Earn semi-dynamique (approbation communautaire le 30 mars 2022, première coupe en escalier le 1^{er} mai 2022) était une réponse directe à l'accélération du taux de consommation de la réserve à travers le T1 2022 malgré le top-up du 8 février. Le DiD de la Phase 9 sur la première coupe en escalier de Prop 20 renvoie un test de Welch significatif à $p = 0,043$ sur l'écart-type journalier UST Binance, validant le fait que l'annonce de la coupe de taux était elle-même un événement de stress d'ancrage — sans doute le premier de l'échec en deux étapes qui a culminé au cas n° 1.

La preuve visuelle est le panneau inférieur de la Figure 11 au chapitre 6 : le top-up de \$450 M du 8 fév. 2022 est visible comme un échelon dans la série réserve-Anchor, avec la consommation lente du T1–T2 et la première coupe en escalier Prop 20 du 1^{er} mai 2022. Le panneau supérieur de la même figure montre la réserve BTC LFG sur la fenêtre appariée (cas n° 3), illustrant l'arbitrage entre accumulation de réserve BTC et reconstitution de la réserve Anchor que LFG menait en parallèle.

8.5 Événements mineurs de niveau 2 (résumé chronologique)

Quatorze événements de niveau 2 sont documentés sur la fenêtre d'analyse et résumés ici par ordre chronologique. Chacun reçoit un descripteur bref ; les horodatages détaillés, hauteurs de bloc et hashes de transaction on-chain sont catalogués dans les artefacts de données supports du rapport.

- **Lancement mainnet d'UST (Columbus-3, 21 sept. 2020)** — début de référence de la fenêtre d'analyse ; ère pré-Anchor, vitesse faible.

- **Lancement du protocole Anchor (17 mars 2021)** — point d’inflexion pour la demande d’UST ; cible d’APY stable à 20 % sur les dépôts UST.
- **Première répétition de mai 2021 (19–27 mai 2021)** — désancrage géré Jump/Tai Mo Shan, confirmé rétrospectivement par le règlement SEC de décembre 2024.
- **Tour de financement LFG \$150 M (21 juil. 2021)** — capitalisation institutionnelle : Jump, 3AC, DeFiance, Pantera, Galaxy ; pose le décor pour la stratégie de réserve BTC.
- **Mise à jour Columbus-5 (30 sept. 2021)** — 100 % du seignuriage LUNA brûlé (contre le partage antérieur avec le community pool).
- **Hack du pont Wormhole (2 fév. 2022)** — 120k wETH drainés ; contagion via le canal de pont sur lequel UST s’appuyait ; Jump Trading recapitalise Wormhole sur son propre bilan.
- **Taux Earn semi-dynamique d’Anchor Prop 20 (1^{er} mars – 1^{er} mai 2022)** — première coupe en escalier 19,5 % → 18 % le 2022-05-01, 8 jours avant le désancrage.
- **Fork Terra 2.0 / Phoenix-1 (28 mai 2022)** — réponse de gouvernance ; nouvelle chaîne sans UST ; snapshot d’airdrop pré-attaque au bloc 7 544 910.
- **Décote stETH (12–19 juin 2022)** — conséquence en aval de l’effondrement d’UST via les liquidations forcées 3AC/Celsius ; bETH dé-wrappé sur Terra → stETH vendu sur Curve.
- **Celsius suspend les retraits (12 juin 2022)** — exposition 3AC + Terra concrétisée ; dépôt de Chapter 11 le 13 juillet.
- **Ordonnance de liquidation 3AC (27 juin – 2 juil. 2022)** — les tribunaux BVI ordonnent la liquidation ; Chapter 15 américain le 2 juillet ; 3AC avait acheté ~10,9 M d’aLUNA (~\$550 M) en février.
- **Chapter 11 de Voyager (5 juil. 2022)** — \$665 M de prêt en défaut par 3AC (15 250 BTC + \$350 M USDC) ; cascade en aval.
- **SEC contre Terraform Labs / Do Kwon (16 fév. 2023 – 4 avril 2024)** — dépôt SDNY n° 23-cv-1346-JSR ; verdict du jury : responsable ; règlement à \$4,5 Md.
- **Règlement SEC contre Tai Mo Shan (déc. 2024)** — amende de \$123 M contre la filiale de Jump Trading ; confirme la défense non organique de l’ancrage de mai 2021.

9 Expériences naturelles et différence-en-différences

Quatre changements paramétriques en escalier sont identifiables on-chain sur la fenêtre d’analyse UST. Pour chacun, nous comparons une fenêtre de 30 jours avant et après (3 jours ou 2 jours pour les événements de la fenêtre de spirale) sur une série de résultat pertinente. Le test principal est le test de rang non paramétrique **Mann–Whitney U**, robuste aux queues lourdes et aux ratios de variance extrêmes qui caractérisent les distributions de résultat de la fenêtre de spirale (les écarts d’offre LUNA s’étendent sur 10^{12} et brisent numériquement la statistique t de Welch en précision finie). Le test t de Welch est rapporté en parallèle comme diagnostic secondaire, protégé contre les cas dégénérés à variance nulle. Résultats principaux :

Exp. événement (date)	Résultat	p_{MWU}	p_t	Verdict
1. Columbus-5 (2021-09-30)	Curve [Shuttle] dev	0,028	0,044	TE en baisse (sig.)
2. Anchor Prop 20 (2022-05-01)	Binance σ journalier	0,512	0,043	σ en hausse (t seul)
3. Déploiement BTC LFG (2022-05-09)	Curve [Wormhole] médiane	—	—	$n = 3/3$ faible pow.
4. Prop 1164 (2022-05-11)	delta de mint LUNA	0,80	0,9999*	$n = 2/2$ faible pow.

* statistique t de Welch numériquement dégénérée ($t \approx 1,9 \times 10^{-6}$) sur l'Expérience 4 car le ratio de variance intra-groupe est trop extrême pour identifier un décalage de moyenne sur le scaling de Welch — c'est précisément la pathologie qui a motivé le choix du test MWU comme primaire.

Expérience 1 — Mise à jour Columbus-5 (2021-09-30). Le burn de 100 % du seigneuriage LUNA a remplacé le partage antérieur communauté/validateurs. Résultat : Curve UST-3pool [Shuttle] |déviations d'ancrage| journalière. **Conclusion : réduction significative de la TE post-mise-à-jour**, $p_{\text{MWU}} = 0,028$, $p_t = 0,044$.

Expérience 2 — Anchor Prop 20 (effective le 2022-05-01). Coupe du taux Earn 19,5 % $\rightarrow$ 17,87 %. Résultat : écart-type journalier UST/USDT Binance sur la fenêtre de 14 jours de chaque côté. **Conclusion : augmentation significative de la variance sur le test t de Welch** ($p_t = 0,043$) mais pas sur le test de rang MWU ($p_{\text{MWU}} = 0,512$) — diagnostic d'un petit nombre de jours post à grosse déviation qui pilotent le décalage de moyenne, cohérent avec la lecture comme précurseur de spirale.

Expérience 3 — Déploiement BTC LFG (2022-05-09). $\sim 80\,000$ BTC engagés pour défendre l'ancrage. Résultat : médiane journalière UST/USD sur Curve UST-3pool [Wormhole] dans la fenêtre de 3 jours de chaque côté. **Conclusion : puissance insuffisante** — seulement 3 observations journalières de chaque côté du seuil, donc aucun test ne rejette. Traité comme purement descriptif.

Expérience 4 — Prop 1164 (2022-05-11). basepool 50 M $\rightarrow$ 100 M SDR, PoolRecoveryBlock 36 $\rightarrow$ 18. Résultat : delta journalier de mint de l'offre LUNA à partir des snapshots du module bancaire. **Conclusion : non significatif**, $p_{\text{MWU}} = 0,80$, avec une différence de moyennes $\Delta = +1,11 \times 10^{12}$ unités LUNA. La statistique t de Welch est numériquement dégénérée ($t \approx 1,9 \times 10^{-6}$, $p \approx 0,9999$) car le ratio de variance intra-groupe est trop extrême pour identifier un décalage de moyenne sur le scaling de Welch — c'est précisément la pathologie qui a motivé le choix du MWU comme primaire. Interprétation : avec $n_{\text{pre}} = n_{\text{post}} = 2$, c'est un test à puissance limitée, pas un résultat nul positif, et nous ne lisons pas le p_{MWU} élevé comme une falsification de la causalité de Prop 1164. Descriptivement, le taux de mint réalisé les 9–10 mai (pré-approbation) était déjà dans le même régime que les 11–13 mai (post-approbation), de sorte que la hausse de paramètre était non contraignante au moment où elle a été votée — cohérent avec une spirale contrainte par la demande mais pas une preuve formelle de celle-ci (voir F4 au chapitre 10).

10 Findings, questions ouvertes et implications V2

10.1 Findings principaux

F1 — log Liq et σ_{LUNA} sont co-dominants ; les deux métriques naturelles de classement divergent légitimement sur l'ordre. Sur le panel complet (chapitre 3, $n = 380$ observations journalières), le R^2 univarié place log Liq au-dessus de σ_{LUNA} (0,237 contre 0,196), tandis que la $|t|$ -statistique corrigée HAC place σ_{LUNA} au-dessus de log Liq (3,01 contre 2,45) :

Régresseur	$ t _{\text{HAC}}$	R^2 univarié
log Liq	2,45	0,237
σ_{LUNA}	3,01	0,196
ANCHOR RATE	1,90	0,004

Ces deux métriques mesurent des choses différentes. Le R^2 univarié est la part de la variance de TE que chaque régresseur explique isolément ; la $|t|$ -statistique corrigée HAC est la précision de l'estimation du coefficient dans la régression jointe avec écarts-types robustes à l'autocorrélation et à l'hétéroscédasticité. Elles peuvent légitimement diverger et c'est le cas ici : log Liq a plus de pouvoir explicatif brut, mais σ_{LUNA} a une identification jointe plus serrée. Nous lisons la paire comme co-dominante sans ordonnancement strict, les canaux de profondeur de pool et de volatilité du collatéral algorithmique portant conjointement le signal de TE .

Les $|t|$ -statistiques iid naïves ($|t|_{\text{naïve}} = 7,76$ pour log Liq, 6,15 pour σ_{LUNA} , 0,75 pour ANCHOR RATE) surestiment la significativité pour les deux régresseurs identifiés d'un facteur $2\text{--}3\times$ car les résidus OLS violent l'iid (BP $p \approx 1,5 \times 10^{-25}$, LB $p \approx 0$ aux retards 5/10/22, $DW = 0,078$, voir Figure 4). Fait intéressant, l'estimateur naïf *sous-estime* le $|t|$ pour ANCHOR RATE (rapport naïf/HAC 0,39 $\times$) : ANCHOR RATE est quasi constant dans l'échantillon, de sorte que sa structure d'autocovariance résiduelle gonfle le SE HAC moins qu'elle ne gonfle le SE iid qui ignore la dépendance temporelle — un petit rappel que « le HAC affaiblit toujours la significativité » est une règle empirique, non un théorème.

Le conditionnement par régime du chapitre 4 soutient cette lecture : la moyenne de $|TE|$ dans le quartile supérieur de σ_{LUNA} vaut $3,2\times$ la moyenne du quartile inférieur (89,4 pb contre 27,8 pb), confirmant que σ_{LUNA} porte le signal de TE de manière non linéaire à travers les régimes — un fait que le seul coefficient OLS linéaire ne fait pas remonter.

Le coefficient de taux Anchor Earn reste non identifié au seuil de 5 % ($p_{\text{HAC}} = 0,057$, limite) — le taux était administrativement fixé à 19,5 % jusqu'au 2022-05-01, ne laissant essentiellement aucune variance intra-échantillon. C'est un avertissement méthodologique, non une affirmation que la demande Anchor ne comptait pas — la demande Anchor se manifeste à travers le canal σ_{LUNA} (la création d'UST financée par Anchor forçait le mint/burn LUNA).

F2 — la log-liquidité est l'absorbeur dominant de variance en régime calme. $\hat{\beta}_2 = -2,1 \times 10^{-3}$ avec HAC $p \approx 0,014$ (exact $p_{\text{HAC}} = 0,0144$). La profondeur du Curve UST-3pool (somme à travers les wrappers Wormhole + Shuttle) est le supprimeur unique le plus puissant de la TE inter-venues en périodes normales, le mécanisme de suppression se brisant une fois la profondeur du pool effondrée les 9–12 mai 2022. F2 et F1 sont des résultats distincts : F1 classe les régresseurs sur la précision jointe sur la fenêtre complète et le pouvoir explicatif isolé, et lit (log Liq, σ_{LUNA}) comme co-dominants sans ordonnancement strict ; F2 caractérise le rôle d'absorbeur de variance de la liquidité spécifique au régime, qui tient jusqu'à la spirale et échoue à l'intérieur de celle-ci.

F3 — la courbe stableswap de Curve a contraint la rupture on-chain de l'ancrage sur la plupart des jours de spirale, puis s'est inversée au fond. Le minimum journalier de Curve UST-3pool [Wormhole] le 2022-05-12 était de \$0,2649 ; le minimum absolu intra-journalier était de \$0,0619 le 2022-05-13 09 :14 UTC durant la fenêtre d'arrêt de chaîne. Le minimum spot Binance UST/USDT sur la fenêtre de spirale était de \$0,2346 le 2022-05-11 07 :38 UTC. L'invariant stableswap est asymétrique en slippage : près de l'ancrage, la courbe absorbe le flux tout en laissant le prix dériver lentement, mais une fois que le solde UST dépasse $\sim 96\%$ du poids du pool (USDT/USDC drainés), le côté amplificateur de slippage de la courbe domine et la cotation on-chain peut tomber sous la cotation CEX. C'est l'arbitrage canonique liquidité-vs-prix dans un stablecoin algorithmique sous run — le stableswap agissant comme un frein à la descente et un accélérateur au fond.

F4 — le DiD formel de Prop 1164 est à faible puissance ; les preuves descriptives sont cohérentes avec une spirale contrainte par la demande. La différence-en-différences de la Phase 9 contre l’approbation formelle de Prop 1164 (2022-05-11 10 :10 UTC) renvoie $p_{MWU} = 0,80$ sur une fenêtre 2-jours pré contre 2-jours post. Avec $n_{\text{pre}} = n_{\text{post}} = 2$, c’est une *absence de puissance statistique* plutôt qu’un résultat positif de « pas d’effet », et nous ne le lisons pas comme une falsification de la causalité de Prop 1164. Les preuves descriptives, en revanche, sont sans ambiguïté : le taux de mint réalisé les 9–10 mai (pré-approbation) était déjà dans le même régime que les 11–13 mai (post-approbation), de sorte que la hausse mécanique de capacité de mint (basepool 50 M $\rightarrow$ 100 M SDR ; PoolRecoveryBlock 36 $\rightarrow$ 18) était non contraignante au moment où elle a été votée. Lus ensemble, le résultat DiD ne réfute pas la causalité de Prop 1164 mais est cohérent avec une spirale contrainte par la demande plutôt que par les paramètres : une fois les arbitragistes sans sortie viable, le plafond que la proposition aurait élevé n’était pas la contrainte contraignante — la signature diagnostique d’un échec de coordination plutôt que d’un échec de conception de mécanisme.

F5 — le drainage de la réserve BTC de LFG est identifiable on-chain pour le portefeuille principal. Le pic publiquement cité de 80 394 BTC d’accumulation (post-mortem LFG mai 2022) est un agrégat multi-portefeuilles ; la reconstruction on-chain de ce travail suit un portefeuille principal avec 71 049 BTC d’entrées brutes, 70 736 BTC de sorties totales sur deux tranches discrètes des 9–10 mai, et le résiduel **313 BTC** apparié au satoshi près (`lfg_btc_wallet_summary`). Cela permet une chronique propre du « ratio de couverture par réserve » pour le portefeuille principal que la pile de monitoring V2 devrait suivre, avec la mise en garde que toute conception partiellement collatéralisée devrait exiger un registre multi-portefeuilles complet dans son manifeste de transparence (voir V2-4).

F6 — la transaction déclencheuse est identifiable. Le 2022-05-07 21 :44 UTC, le portefeuille 0x8d47... échange 85 M UST $\rightarrow$ 84,5 M USDC sur Curve UST-3pool [Wormhole], après une soirée identifiable d’afflux d’UST ponté via Wormhole vers Ethereum. Un second portefeuille a exécuté quatre swaps de 25 M-UST dans les 13 minutes suivantes. Nous caractérisons la cascade comme *opérationnellement irréversible* à partir d’environ 2022-05-09 15 :00 UTC — 41 heures après le déclenchement — sur un critère empirique en deux parties : (i) à cette heure, le prix médian de Curve UST-3pool [Wormhole] s’était stabilisé à \$0,985 (base $-1,5\%$ contre \$1, à comparer à $-0,12\%$ médian pour les 4 mois précédents), et (ii) le plus grand flux de défense disponible — la tranche LFG monoportefeuille de 42 531 BTC au 2022-05-09 18 :34 :13 UTC, déployée 3,5 h plus tard — n’a pas réussi à comprimer la base : la médiane Curve est tombée à \$0,94 à 19 :00 UTC et \$0,85 à 23 :00 UTC. Le « point de non-retour » est donc le moment au-delà duquel le plus grand contre-flux disponible (LFG OTC + réserve Anchor + profondeur Curve) ne pouvait plus tenir le bassin Curve contre la pression de rachat.

F7 — la vitesse de rachat Anchor a culminé à 228 813 événements `anchor_redeem_stable`. C’est l’amplificateur côté demande — les déposants retirant l’UST qui devait être soit absorbé par la liquidité Curve (saturée) soit brûlé pour LUNA (ce qui amplifiait σ_{LUNA} , voir F1, boucle de rétroaction fermée). Le tampon de réserve de rendement s’est drainé de manière linéaire à travers la fenêtre de coupe Prop 20 du 4 mai, même si le taux nominal de $19,5\%$ tenait.

F8 — le cycle d’arbitrage cross-chain a saturé en 4 heures. Pré-crash : la base de Curve UST-3pool [Wormhole] contre \$1 s’établissait à une médiane journalière de -12 pb ($-0,12\%$) — les arbitragistes achetaient sur Curve et rachetaient via le pont Wormhole en quelques heures. Après le 7 mai 21 :44 UTC : la latence de rachat de pont a dépassé l’échelle de temps de décroissance des prix. C’est le résultat pertinent pour la conception V2 — une

défense d’ancrage reposant sur un cycle d’arbitrage cross-chain pluri-horaire est structurellement incapable d’absorber un choc de liquidité à l’échelle minute.

F9 — partition de liquidité par canal de pont durant la spirale. Durant la fenêtre du 7–13 mai, les wrappers Wormhole et Shuttle se sont désynchronisés dramatiquement. Le volume brut Wormhole s’est multiplié à \$7,36 Md ($\times 3,5$ contre le mois d’amorçage) avec une sortie nette de $-\$343$ M (les burns dominant). Shuttle s’est inversé en direction, prenant $+\$154$ M de flux net entrant sur un volume brut décroissant. Le mécanisme est une partition des canaux de liquidité : les détenteurs accédant à UST via Shuttle étaient structurellement incapables de sortir par le Curve UST-3pool [Wormhole] plus profond sans dé-wrapper et re-wrapper à travers Terra (un cycle d’arbitrage qui avait lui-même saturé, selon F8), et \$308 M d’UST [Shuttle] sont restés bloqués dans le pool peu profond post-crash. L’implication pour la conception V2 : la TVL agrégée ou la liquidité cross-chain agrégée n’est pas la bonne métrique en stress — ce qui compte est la profondeur de chaque canal de sortie individuel, parce que les canaux ne sont pas interchangeables une fois que le règlement d’arbitrage sature.

10.2 Questions ouvertes

Q1 — Le portefeuille déclencheur a-t-il agi avec intention ? L’étude de cas Phase 8 n° 1 documente l’historique du portefeuille 0x8d47... (dormance pré-2022, activation le 7 mai, timing des entrées Wormhole). Ce rapport n’affirme pas l’intention — l’attribution reste forensique, non statistique. Ouvert pour la prédiction V2 : l’empreinte on-chain *avant* le déclenchement peut-elle distinguer une attaque dirigée d’une cascade de liquidation ?

Q2 — Le coefficient Anchor est-il non identifiable en échantillon ou inexistant ? F1 ne peut distinguer « le taux Anchor compte mais est constant » de « le taux Anchor ne compte pas au niveau linéaire ». Une conception V2 livrée avec un mécanisme de rendement variable (et un engagement crédible à le faire varier) créerait la variance d’identification.

Q3 — Quel ratio minimal de réserve LFG aurait tenu l’ancrage ? La réserve de 80 394 BTC représentait $\sim 17\text{--}19\%$ de l’offre UST flottante à la valorisation de pic du BTC (chapitre 6). Question contrefactuelle : à quel seuil CR % la défense d’ancrage soutenue par la réserve converge-t-elle ? Empiriquement non testable sur UST seul ($n = 1$ événement) ; le cadre de simulation V2 devrait l’explorer.

Q4 — La base Curve-vs-Binance était-elle un indicateur avancé ? Pré-crash, la base médiane journalière valait -12 pb ($-0,12\%$, négative sur Curve). Deux pics de base à $> 3\sigma$ à $-2,0\%$ le 2022-04-10 puis le 2022-05-04 ont précédé le déclenchement de 27 jours et 3 jours respectivement. La série de la base est-elle un indicateur avancé viable ? C’est un artefact du chapitre 3 que nous avons mais que nous n’avons pas formalisé en un estimateur d’indicateur avancé — promu au backlog de prédiction V2 (*niveau 2*).

Q5 — Pourquoi la base wrapper Wormhole vs Shuttle est-elle non nulle au quatrième trimestre 2021 ? Les deux wrappers référencent le même UST sous-jacent mais transitent par des contrats de pont différents. Une base persistante de quelques points de base existe au T3–T4 2021 que la Phase 5 n’explique pas entièrement. Hypothèse : gaz différentiel de sortie de pont + latence de rachat. Ouvert pour un monitoring cross-wrapper V2.

10.3 Implications pour la spécification de monitoring V2 de Derivalink

V2-1 — Suivre $\sigma_{\text{collateral}}$ comme signal primaire de stress d’ancrage. Quel que soit le panier de collatéral (LUNA, stETH, sUSDe, ...), la volatilité réalisée de l’actif de collatéral

est le meilleur indicateur avancé unique de franchissement de bande d’ancrage. Cela généralise F1 au-delà d’UST. La pile d’alertes V2 devrait escalader sur les z-scores de $\sigma_{\text{collateral}}$ avant les z-scores de TE.

V2-2 — Suivre la *profondeur de liquidité à l’ancrage*, non la TVL totale. F2 + F3 ensemble : ce n’est pas la TVL totale qui comptait, c’est la profondeur de la courbe au niveau d’ancrage. La pile de monitoring V2 devrait exposer « rachetable en USD dans une bande de slippage de 50 pb » comme métrique de premier rang.

V2-3 — Suivre le budget de latence de règlement cross-chain. F8 implique une alerte V2 : si la défense d’ancrage du protocole dépend d’un cycle d’arbitrage à plusieurs sauts (par ex. Ethereum → pont → chaîne native → rachat), la latence de ce cycle est la borne supérieure des chocs de demande absorbables. La pile V2 devrait publier une métrique « minutes-jusqu’à-l’arbitrage » par actif.

V2-4 — Suivre le ratio de couverture par réserve pour les conceptions partiellement collatéralisées. F5 implique que la pile V2 devrait maintenir une chronique de $CR(t)$ par actif contre un registre de portefeuilles de réserve (type LFG). La spécification V2 devrait publier un manifeste JSON des portefeuilles de réserve par actif, rafraîchi à cadence journalière.

V2-5 — Suivre les z-scores de vitesse de rachat. F7 identifie la vitesse de rachat Anchor comme l’amplificateur. La pile V2 devrait suivre le compte d’événements analogue du mécanisme de rachat par actif (Anchor pour UST, DSR pour DAI, brûlages de vault pour Synthetix, ...) sur une base de z-score roulant.

V2-6 — Diagnostic de couplage de queue entre actif d’ancrage natif et collatéral. Le chapitre 7 démontre la dépendance de queue asymétrique entre UST et LUNA. La pile V2 devrait exposer un diagnostic de copule de queue inférieure roulante entre chaque synthétique et son actif principal de collatéral / seigneurage.

V2-7 — Suivre la liquidité de sortie par canal, non agrégée. F9 implique que la liquidité agrégée masque le risque structurel de partition. Pour tout actif ayant plusieurs variantes wrapper de pont sur une chaîne hôte (ou plusieurs chaînes avec des profils de liquidité différents), la pile V2 devrait exposer par canal « rachetable en USD dans 50 pb » comme métriques séparées, et alerter sur la divergence inter-canaux comme indicateur avancé du stress de partition de liquidité.

10.4 Ce que ce rapport n’affirme pas

- Aucune affirmation causale sur l’intention du portefeuille (Q1).
- Aucune affirmation contrefactuelle sur le ratio minimal de réserve qui aurait tenu l’ancrage (Q3 reste ouverte).
- Aucune affirmation de valeur prédictive hors-échantillon pour la base Curve-Binance (Q4 différée au niveau 2 V2).
- Aucune affirmation que Prop 1164 *a causé* l’hyperinflation, *et* aucune affirmation qu’elle ne l’a pas causée : le DiD formel est à faible puissance ($n = 2/n = 2$). Le compte rendu descriptif est cohérent avec une spirale contrainte par la demande, mais le test formel ne peut trancher (F4).

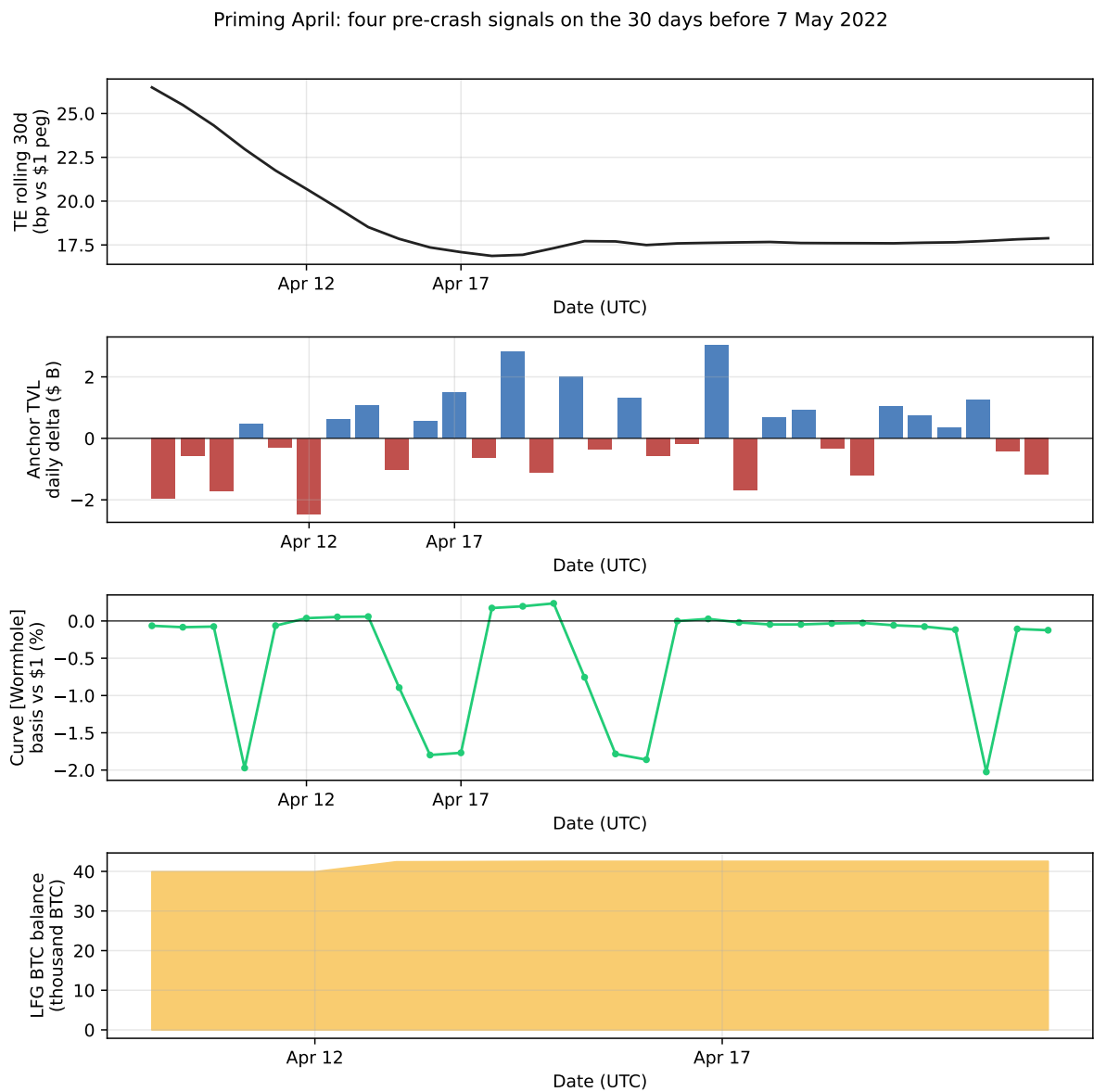


FIGURE 15 – Pile à quatre panneaux de signaux d’amorçage d’avril sur la fenêtre de 30 jours précédant la transaction déclencheuse : TE RMSE roulant 30 jours (pb), delta journalier de TVL Anchor (\$ Md), base Curve UST-3pool [Wormhole] vs \$1 (%), solde du portefeuille BTC LFG (milliers de BTC).

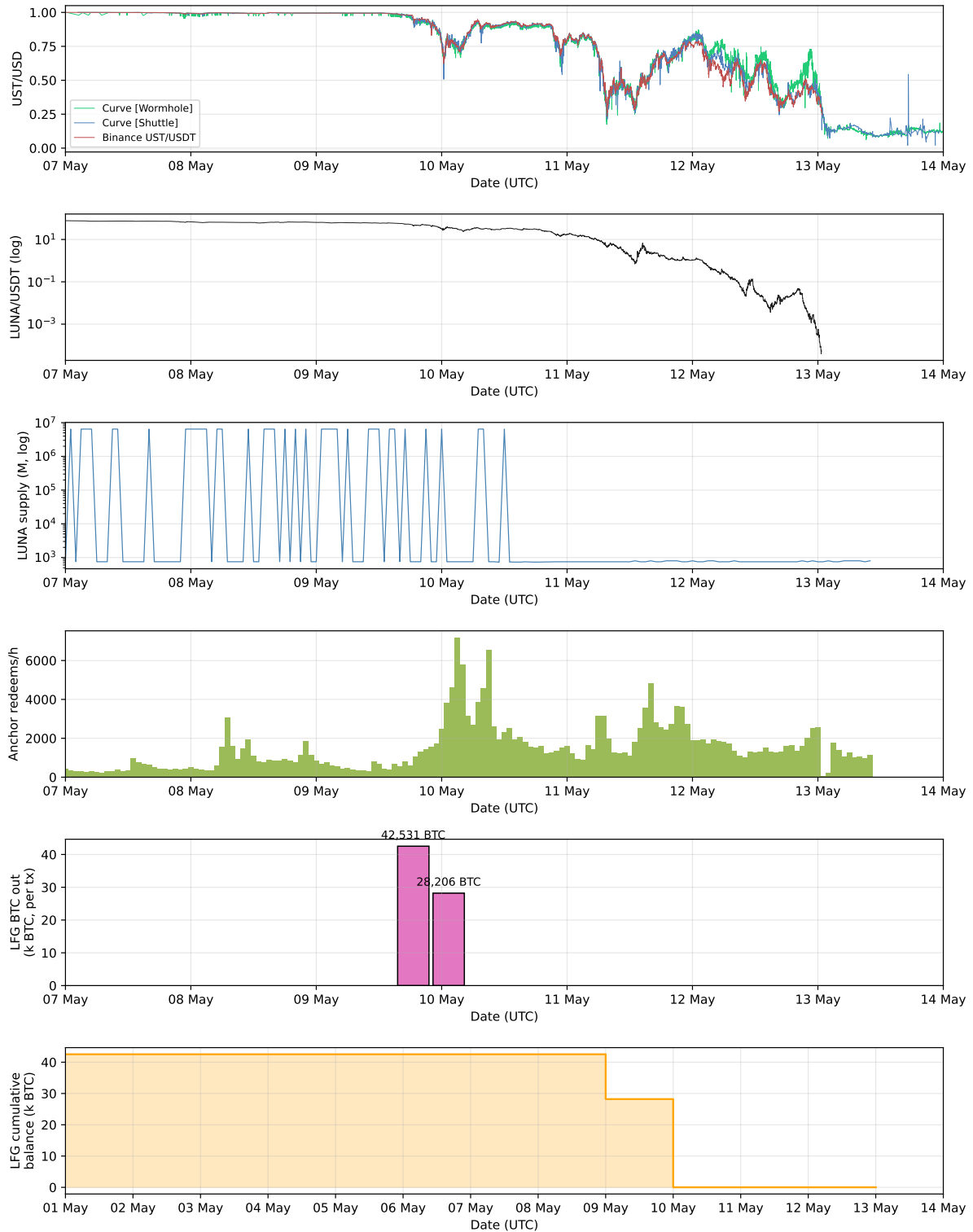


FIGURE 16 – Reconstruction à six panneaux de la spirale de la mort : UST/USD à travers Curve+Binance (panneau 1), LUNA/USDT en échelle log (2), offre LUNA en échelle log (3), compte horaire de rachats Anchor (4), montants des sorties BTC LFG (5), solde cumulé LFG (6).

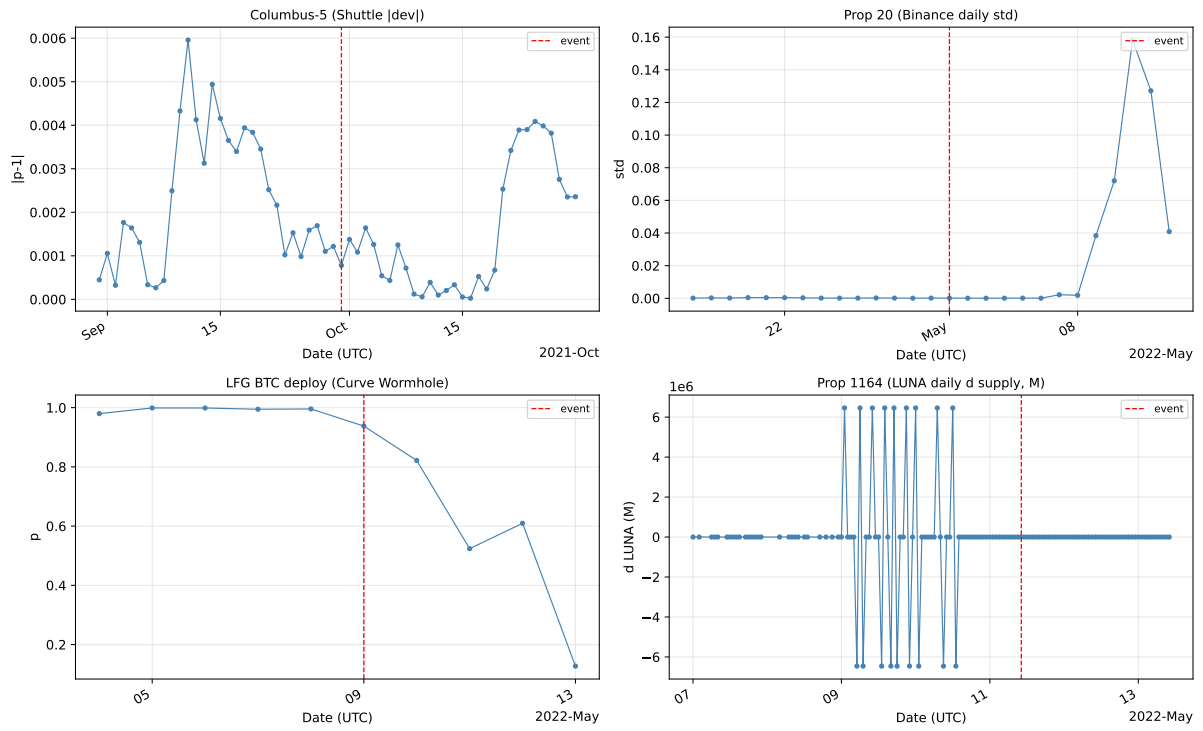


FIGURE 17 – Quatre panneaux d’expériences naturelles, chacun centré sur l’événement (ligne verticale rouge) avec une fenêtre de ± 30 jours (ou 3 jours pour les événements de la semaine de spirale).