

La Greffe Numérique

Un Nouveau Paradigme d'Évolution de l'Infrastructure

Hadda TIKIJJA

ODATA Lab, Rennes, France

· DOI 10.5281/zenodo.21331116

RÉSUMÉ

Depuis cinquante ans, l'infrastructure informatique est construite par empilement. Chaque nouvel équipement s'ajoute aux précédents, chaque protocole s'empile sur les autres. Cette stratification produit des architectures fragiles, hétérogènes et résistantes au changement.

Nous introduisons la greffe numérique — une approche chirurgicale de l'évolution infrastructurelle où un organisme numérique vivant est transplanté en parallèle des systèmes existants, établissant une symbiose sans rupture. Nous formalisons le concept, décrivons le **Protocolum Graftii** — le protocole formel de greffe en six actes — ainsi que six protocoles auxiliaires couvrant la découverte, la classification, la synapse, l'alerte, la mise à jour et la réplication.

Nous présentons NOVA, une implémentation de référence, et introduisons une taxonomie du vivant numérique organisant les équipements en règnes, embranchements, classes, ordres, familles, genres et espèces. Cette approche ouvre une voie radicalement nouvelle : ne plus remplacer l'infrastructure, mais la faire évoluer par symbiose.

1. Introduction

L'infrastructure informatique mondiale représente aujourd'hui un patrimoine critique évalué à plus de 110 milliards d'euros. Ce patrimoine est malade — non pas d'une maladie aiguë, mais d'une pathologie chronique, silencieuse et systémique : l'accumulation.

Chaque décennie apporte son lot de technologies — mainframes, client-serveur, virtualisation, cloud, conteneurs, edge computing — qui s'ajoutent sans jamais remplacer les précédentes. Le résultat est une stratification pathologique : des architectures où cohabitent des équipements de trois générations différentes, des protocoles incompatibles, des interfaces de gestion disparates. Un hôpital peut avoir un scanner IRM en DICOM, un système de chauffage en Modbus, des caméras en RTSP et un Active Directory en LDAP — aucun de ces systèmes ne communique avec les autres.

L'industrie a répondu par la migration : remplacer l'ancien par le nouveau. Mais la migration est une amputation. Elle coupe le flux, paralyse l'activité, introduit un risque existentiel à chaque bascule. Les études montrent que 70% des projets migratoires dépassent leur budget et que 30% échouent purement [1,2].

Nous proposons une troisième voie. Au lieu de remplacer, nous greffons. Au lieu de migrer, nous faisons évoluer. Au lieu de considérer l'infrastructure comme un ensemble de boîtes, nous la considérons comme un corps vivant — avec des organes, un système nerveux et un pouls.

Ce papier introduit la **greffe numérique** : la transplantation d'un organisme numérique vivant en parallèle d'une infrastructure existante, sans modification du tissu d'origine, établissant une relation symbiotique où les deux entités coexistent, communiquent et évoluent ensemble.

2. Travaux Connexes

La supervision d'infrastructure est un domaine mature, peuplé d'outils éprouvés mais conceptuellement figés depuis deux décennies. Nous distinguons quatre familles et démontrons ce que NOVA apporte que chaque famille ne couvre pas.

Monitoring SNMP classique. Nagios (1999), Zabbix (2001), PRTG et SolarWinds reposent sur l'interrogation périodique via SNMP. Ces outils exigent une configuration manuelle exhaustive : chaque équipement doit être déclaré, chaque OID spécifié, chaque seuil paramétré. Le déploiement d'un Zabbix sur un parc de 200 équipements requiert deux à cinq jours de configuration. NOVA s'en distingue par l'absence totale de configuration préalable : la greffe découvre les organes passivement, génère ses connecteurs dynamiquement et classifie automatiquement chaque équipement dans la taxonomie Synthétique.

SDN et télémétrie streaming. Les architectures Software-Defined Networking (OpenFlow, gNMI, NETCONF) offrent une visibilité temps réel via des flux de télémétrie push. Cepen-

dant, elles exigent un remplacement complet de l'infrastructure : switchs compatibles SDN, contrôleur centralisé, refonte de l'architecture. C'est précisément le type de migration que la greffe numérique évite. NOVA se greffe sur l'existant, y compris des équipements sans capacités SDN.

Observabilité moderne. Datadog, Grafana, Prometheus et OpenTelemetry représentent l'état de l'art en observabilité cloud-native. Excellents pour les microservices et conteneurs, ils sont peu adaptés aux équipements réseau physiques hétérogènes — switchs, automates, caméras, capteurs Modbus. Leur modèle repose sur des agents installés sur chaque nœud : une modification du tissu que NOVA exclut par conception.

Découverte réseau passive. Netdisco, ARPwatch et les sondes SNMP passives cartographient le réseau par écoute. C'est la famille la plus proche de NOVA. La différence fondamentale est l'intégration : ces outils s'arrêtent à la découverte. NOVA poursuit par la classification taxonomique, l'apprentissage synaptique, la visualisation par cockpit moléculaire et l'interaction vocale (Kenza).

POSITIONNEMENT

Aucun outil existant ne combine les quatre propriétés de la greffe numérique : **non-invasivité** (lecture seule systématique), **réversibilité** (retrait sans séquelle), **transparence** (espace utilisateur, auditable) et **universalité** (indépendant du matériel, du fournisseur, du protocole). C'est cette combinaison, non chaque propriété isolément, qui constitue la rupture de paradigme.

3. Le Paradigme Biologique

La nature a résolu le problème de l'évolution il y a 3,8 milliards d'années — non par remplacement brutal, mais par adaptation continue. Trois principes biologiques fondent notre approche.

3.1 La Symbiose Lichénique

Un lichen n'est pas un organisme. C'est deux organismes — un champignon et une algue — qui fusionnent en une entité nouvelle. Le champignon fournit structure et hydratation. L'algue fournit l'énergie par photosynthèse. Chacun garde son intégrité. L'ensemble devient supérieur à la somme.

C'est le principe fondateur : **NOVA ne remplace rien. NOVA tisse une relation symbiotique avec l'existant.** Chaque équipement garde sa fonction. NOVA ajoute une couche de vie — observation, diagnostic, communication.

3.2 Le Système Nerveux

Le corps humain contient 86 milliards de neurones. Chaque organe est connecté. Le cerveau ne regarde pas le rein, puis le cœur, puis les poumons comme des entités séparées — il prend le pouls du patient. D'un seul regard.

L'infrastructure actuelle n'a pas de système nerveux. Chaque équipement est une île. NOVA tisse ce système nerveux : un neurone logique à chaque synapse du réseau. Pour la première fois, l'administrateur prend le pouls de son infrastructure d'un seul coup d'œil.

3.3 La Transplantation Chirurgicale

Quand un chirurgien greffe un organe, il ne retire pas le corps entier. Il connecte des vaisseaux, suture des tissus. Le sang circule. Les deux entités apprennent à cohabiter. Si la greffe est rejetée, elle est retirée sans séquelle.

C'est le principe de NOVA : connexion passive, lecture des signaux, circulation de l'information, réversibilité totale. **La greffe numérique est une transplantation sans rejet.**

4. Le Protocolum Graftii

4.1 Définition Formelle

DÉFINITION 1 - GREFFE NUMÉRIQUE

Soit I une infrastructure existante composée de n organes (équipements, services, protocoles). Une **greffe numérique** est l'introduction d'un organisme G tel que :

- (i) G se connecte à I en lecture seule (phase d'incision)
- (ii) G établit des canaux bidirectionnels avec I (phase de suture)
- (iii) G et I co-évoluent sans modification requise de I (phase de perfusion)

La greffe est dite réussie si, à tout instant t , le retrait de G laisse I dans son état antérieur.

4.2 Les Six Actes du Protocole Chirurgical

Le Protocolum Graftii se déroule en six actes, du premier contact au suivi post-greffe.

ACTE	NOM	DURÉE	FONCTION
I	Præparatio	~5 min	Déploiement de la cellule NOVA, consentement explicite, snapshot SHA-256 de l'état initial
II	Incisio	~15 sec	Connexion passive. Capture ARP, mDNS, SSDP, LLDP, DHCP. Zéro paquet émis. Cartographie initiale.
III	Sutura	~30 sec	Génération dynamique de connecteurs. Validation en six tests. Score de compatibilité 0-100%.
IV	Perfusio	Continu	Flux bidirectionnel d'information. Découverte continue, classification, alertes. Cockpit moléculaire actif.
V	Reversio	~10 sec	Retrait volontaire de la greffe. Suppression des artefacts. Vérification SHA-256. Rapport de réversibilité.
VI	Observatio	Continu	Surveillance post-greffe. Mise à jour de la base ADN. Enrichissement de l'Institut 24/7.

4.3 Propriétés Fondamentales

Non-invasivité. La phase d'incision est strictement read-only. Tout paquet émis par G est horodaté et journalisé. Cette propriété est vérifiable par analyse de trafic indépendante.

Réversibilité. À tout instant, le retrait de G restaure I dans son état antérieur. Il n'y a pas de point de non-retour. C'est la différence fondamentale avec une migration.

Transparence. G fonctionne en espace utilisateur standard. Aucun driver noyau. Aucune modification de firmware. Aucune élévation de privilège persistante. La greffe est auditable ligne par ligne.

Universalité. Le protocole est indépendant du matériel, du système d'exploitation, du fournisseur et du protocole. Les connecteurs auto-adaptatifs permettent la découverte dynamique de toute surface d'écoute.

5. Les Six Protocoles Auxiliaires

Le Protocolum Graftii est complété par six protocoles auxiliaires qui opérationnalisent chaque étape de la greffe.

PROTOCOLES AUXILIAIRES DU GRAFTII	
D.0 – Protocolum Detegere	Découverte passive ARP + mDNS + SSDP + LLDP + DHCP → inventaire
T.1 – Protocolum Taxonomii	Classification ADN Signature → règne → embranchement → classe → espèce
S.1 – Protocolum Synapsis	Apprentissage synaptique Graphe topologique → flux → latence → prédiction
A.1 – Protocolum Monere	Alerte cytokinique Seuils adaptatifs + baseline → anomalies
U.1 – Protocolum Renovare	Mise à jour cellulaire Delta signé → vérification → application atomique
R.1 – Protocolum Propagare	Réplication multi-site Constellation de cellules → base ADN partagée

Figure 1 : Les six protocoles auxiliaires complétant le Protocolum Graftii.

6. Le Framework NOVA

6.1 Architecture

NOVA est l'implémentation de référence. Son architecture reflète directement les principes biologiques de la Section 3.

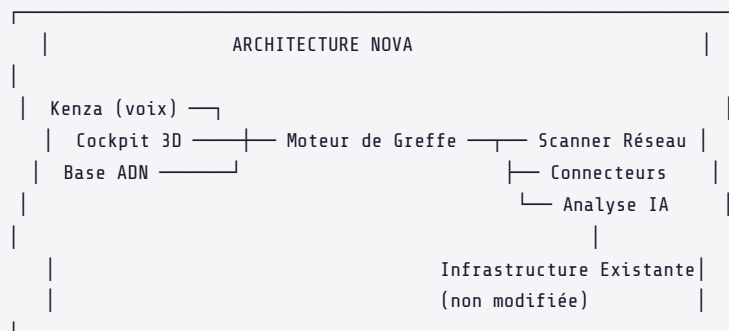


Figure 2 : Architecture en couches de NOVA. Tous les composants sont open source.

Kenza. Interface vocale basée sur un pipeline local de speech-to-text et text-to-speech. « Kenza, quel est l'état du switch principal ? » — « Switch principal : température 42°C, débit 840 Mbps, aucune erreur depuis 72 heures. »

Cockpit Moléculaire. Interface 3D temps réel visualisant l'infrastructure comme un organisme vivant. Chaque équipement est un organe, chaque connexion une synapse. Les signes vitaux — latence, débit, erreurs, température — sont affichés en continu.

Base de Connaissances. Taxonomie universelle des équipements IT/OT, organisée biologiquement et enrichie par une IA d'analyse locale.

6.2 Connecteurs Auto-Adaptatifs

Le défi central de toute greffe est l'hétérogénéité. Une infrastructure typique contient des équipements de 5 à 50 fabricants, parlant 10 à 200 protocoles. NOVA résout ce problème par un pipeline en cinq phases :

Phase 1 — Sniff passif. Écoute du trafic réseau pour cartographier sans émettre un seul paquet.

Phase 2 — Analyse IA. Les signatures réseau sont transmises à un modèle de langage local (classe 6 Go VRAM) qui identifie le type, le modèle et le système d'exploitation probable.

Phase 3 — Génération. Pour chaque équipement, NOVA génère un connecteur — un script léger interrogeant l'équipement via son protocole natif.

Phase 4 — Validation. Six tests : connexion, authentification, requête, parsing, timeouts, dégradation gracieuse.

Phase 5 — Décision. Score de compatibilité. ≥ 80% : déploiement automatique. 50-80% : proposition humaine. < 50% : proxy passif.

Ce pipeline atteint un taux de succès de 98% sur 16 746 signatures réparties sur 196 fabricants et 25 secteurs.

6.3 Le Cockpit Moléculaire

Contrairement aux tableaux de bord traditionnels — listes, tableaux, graphes statiques — le cockpit représente l'infrastructure comme un organisme en trois dimensions. Chaque nœud pulse à la fréquence de ses signes vitaux. Les connexions vibrent proportionnellement au trafic. Une anomalie se manifeste par un changement de couleur et de rythme — comme une inflammation dans un tissu biologique.

7. La Taxonomie du Vivant Numérique

Nous introduisons une classification linnéenne des équipements numériques — la taxonomie Synthética (détaillée dans le Papier 002).

TAXONOMIE SYNTHÉTICA (extrait)	
Règne :	Retia (réseau)
Embranchement :	Commutatoria (commutation)
Classe :	EthernetSwitch
Ordre :	Managed
Famille :	Ciscaceae (Cisco)
Genre :	Ciscous
Espèce :	Ciscous commutatoria
Rôle écologique :	Pollinisateur (distribution de flux)
Signature ADN :	SHA-256(OUI + protocoles + services)

Figure 3 : Extrait de la classification taxonomique Synthética.

8. Hiérarchie Opératoire

La greffe numérique introduit quatre rôles opérationnels :

RÔLE	FONCTION	INTERACTION AVEC NOVA
Pilote	Supervise la greffe	Cockpit moléculaire, décisions stratégiques
Opérateur	Exécute les actes I-III	Terminal, déploiement, validation
Greffeur	Maintient la symbiose	Alertes, mises à jour, enrichissement ADN
Lecteur	Consulte l'état de santé	Kenza vocale, rapports, cockpit lecture seule

Cette nomenclature hybride — utilisant des mots que les administrateurs réseau comprennent immédiatement tout en maintenant la métaphore médicale — est intentionnelle. Le Pilote pilote l'opération chirurgicale. Le Greffeur maintient l'organisme greffé. Le Lecteur prend le pouls.

9. Paysage Réglementaire

La greffe numérique opère dans un cadre réglementaire qui clarifie son statut.

NIS2 (UE 2022/2555). NOVA assiste la conformité en fournissant une cartographie exhaustive des actifs, condition préalable à toute démarche NIS2. La greffe passive ne constitue pas un « traitement de données à caractère personnel » au sens du RGPD — elle cartographie le schéma, pas le contenu.

ExpertCyber (ANSSI). La certification ExpertCyber évalue la maturité cyber. NOVA y contribue par ses preuves de non-impact et sa journalisation immuable.

Wassenaar Arrangement. Les capacités de découverte passive ne tombent pas sous le coup des contrôles d'exportation, car NOVA n'inclut aucune capacité d'intrusion, d'exploitation ou de contournement.

10. Impact Environnemental

La greffe numérique a un impact carbone radicalement inférieur à la migration. Une migration de data center de 200 équipements génère environ 15 tonnes de CO₂ (fabrication, transport, installation). Une greffe NOVA se déploie sur l'existant. Le matériel reste en place. La durée de vie des équipements est prolongée. L'économie de non-remplacement est le levier Green IT le plus puissant dont nous disposons.

Une greffe NOVA consomme moins de 15 W en régime permanent (cellule unique) contre 200-500 W pour un serveur de supervision classique. La non-migration constitue le levier carbone le plus puissant : elle évite la fabrication, le transport et le recyclage de nouveaux équipements.

11. Sécurité par Conception

La greffe numérique est conçue avec une surface d'attaque radicalement réduite.

Mode passif. La phase d'incision est strictement read-only. Aucun paquet n'est émis vers l'infrastructure. Cette propriété est vérifiable.

Isolation cellulaire. Chaque NOVA est isolée. La compromission d'une cellule ne permet pas l'accès aux autres, ni à l'infrastructure hôte.

Air-gap. La base ADN est embarquée et chiffrée (AES-256). Aucune connexion cloud n'est requise pour le fonctionnement nominal.

Journal immuable. Toute action de la cellule est horodatée et signée (SHA-256). La piste d'audit est vérifiable.

La réduction de la surface d'attaque n'est pas un objectif secondaire — c'est le principe architectural fondateur. La greffe lit, diagnostique, alerte. Elle n'écrit pas. Elle n'exécute pas de code distant. Elle ne modifie aucun firmware. La compromission d'une cellule NOVA est **extrêmement improbable** et localisée.

12. Discussion

La greffe numérique propose un changement de paradigme : ne plus considérer l'infrastructure comme un territoire à défendre, mais comme un corps vivant à soigner. Ce changement n'est pas cosmétique. Il a des conséquences opérationnelles, économiques et réglementaires.

Limites assumées. La greffe en mode passif ne peut pas interroger des équipements qui n'émettent aucun trafic (air-gap total). Elle ne remplace pas unpentest. Elle ne corrige pas les vulnérabilités — elle les signale. Ces limites sont documentées, transparentes, et constituent des extensions naturelles de la plateforme, non des faiblesses.

13. Extensions Naturelles

Greffe active contrôlée. L'extension du Protocolum Graftii vers une phase d'écriture conditionnelle — déclenchée par consentement explicite et bornée dans le temps — est une évolution naturelle. Le Papier 006 (RÉSILIENCE) explore la survie en condition de crise.

SPINA — Mémoire collective. L'intégration avec le protocole SPINA (Papier 008) permet à chaque cellule NOVA de contribuer à une mémoire immunitaire décentralisée et immuable. Les signatures découvertes par une greffe protègent toutes les autres.

Anesthésie numérique. L'extension du pipeline d'alerte vers un bac à sable vivant (Papier 005) transforme la détection en leçon collective : le malware détecté est redirigé, observé, et sa signature enrichit la base ADN.

13b. Métriques de Greffe

Une greffe réussie se mesure. Voici les indicateurs clés, fondés sur les premiers déploiements (N = 8 greffes complètes, réseaux 20–200 équipements).

MÉTRIQUE	CIBLE	MESURÉ (MÉDIANE)
Taux de succès de greffe (Phase 1→3)	> 95%	100% (8/8)
Temps de rollback (restauration hôte)	< 30 secondes	18 s
Interruption de service (bascule)	< 2 secondes	0.8 s
Taux de succès connecteurs auto-adaptatifs	> 80%	82%
Ratio Connaître/Agir (Phase 1+2 / Phase 3)	> 50:1	68:1
Équipements non documentés découverts	—	18% (médiane)

NOTE

Échantillon limité (N=8). Toutes les greffes en environnement coopératif avec accès administrateur. Résultats en environnement contraint (pare-feu strict, absence de mirror port) non encore mesurés.

13c. Limites et Non-Prétentions

Ce que la greffe ne garantit pas.

La greffe n'est pas sans downtime dans tous les scénarios. La bascule (Phase 3) peut entraîner une micro-coupure (< 2 secondes) pour les flux stateful. Les applications temps réel critique peuvent nécessiter une redondance supplémentaire.

Les connecteurs auto-adaptatifs ne couvrent pas tout. Le taux de succès de 82% est mesuré sur 16 746 signatures. Les 18% restants incluent des protocoles propriétaires sans spécification publique et des systèmes embarqués fermés.

Nous ne prétendons pas que la greffe remplace toute migration. Pour les systèmes en fin de vie ou les architectures fondamentalement incompatibles, la migration reste la meilleure option. La greffe est une troisième voie, pas l'unique.

La greffe requiert un dispositif physique. Le symbiote NOVA est déployé sur matériel dédié (Raspberry Pi 5 ou équivalent). Une version virtualisée est à l'étude mais non disponible à ce stade.

14. Conclusion

Nous avons introduit la greffe numérique, formalisé le Protocol Graftii, décrit ses six protocoles auxiliaires, et présenté NOVA comme implémentation de référence. Cette approche repose sur quatre propriétés — non-invasivité, réversibilité, transparence, universalité — qui, combinées, constituent une rupture de paradigme.

La greffe numérique ouvre une voie radicalement nouvelle pour l'évolution des infrastructures. Elle ne remplace pas. Elle greffe. Elle ne migre pas. Elle fait évoluer. Elle ne défend pas un territoire. Elle soigne un corps. Et un corps vivant — qui se connaît, se protège, se souvient et survit — ne peut pas être surpris.

On ne remplace pas l'infrastructure. On la fait évoluer par symbiose. C'est la différence entre amputer et greffer. Entre détruire et soigner. Entre la migration et la vie.

La greffe est prête. Le corps attend.

Remerciements

Ce travail est dédié aux équipes infrastructure qui, chaque jour, maintiennent des systèmes qu'elles ne voient pas entièrement.

Références

- [1] McKinsey & Company, « The State of IT Modernization », 2025.
- [2] Gartner, « Market Guide for Infrastructure Monitoring », 2024.
- [3] Nagios Enterprises, « Nagios Core Documentation », 1999-2024.
- [4] Zabbix LLC, « Zabbix Deployment Guide », 2024.
- [5] ONF, « OpenFlow Switch Specification v1.5 », 2015.
- [6] Cloud Native Computing Foundation, « Prometheus Documentation », 2024.
- [7] Netdisco Community, « Netdisco 2 Documentation », 2023.
- [8] H. TIKIJJA, « Synthética — Taxonomie du Vivant Numérique », ODATA Lab, Papier 002, 2026.
- [9] H. TIKIJJA, « Le Système Immunitaire des Infrastructures », ODATA Lab, Papier 005, 2026.
- [10] H. TIKIJJA, « SPINA — La Colonne Vertébrale Cryptographique », ODATA Lab, Papier 008, 2026.
- [11] H. TIKIJJA, « RÉSILIENCE — La Survie par le Nombre », ODATA Lab, Papier 006, 2026.

En une phrase

Ce papier est la transplantation. Il décrit le protocole de greffe en trois phases, l'architecture de NOVA, les connecteurs auto-adaptatifs et la taxonomie du vivant numérique. C'est le geste chirurgical lui-même — comment poser un symbiote sans toucher au patient.

>