

La Greffe Numérique

Un Nouveau Paradigme d'Évolution
de l'Infrastructure

Hadda THAJJA

ODATA Lab — Rennes, France

Juillet 2026

La Greffe Numérique :

Un Nouveau Paradigme d'Évolution de l'Infrastructure

Hadda TIKIJJA

ODATA Lab, Rennes, France

`contact@odata.fr`

Juillet 2026

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 capable de scanner, cartographier et diagnostiquer toute infrastructure sans modification du tissu existant. Nous introduisons également une taxonomie du vivant numérique, une hiérarchie opératoire en quatre rôles (Pilote, Opérateur, Biotechnicien, Lecteur), et une analyse complète du paysage réglementaire mondial. 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, clients-serveurs, 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 connecté en DICOM, un système de chauffage en Modbus, des caméras en RTSP, et un active directory en LDAP — aucun de ces systèmes ne se parle.

L'industrie a répondu à ce problème par la migration : remplacer l'ancien par le nouveau. Mais la migration est une amputation. Elle coupe le flux. Elle paralyse l'activité. Elle introduit un risque existentiel à chaque bascule. Les études montrent que 70% des projets de migration dépassent leur budget, et 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 co-existent, 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.

Monitoring SNMP classique. Nagios (1999), Zabbix (2001), PRTG, et SolarWinds reposent sur l’interrogation périodique d’équipements via SNMP. Ces outils exigent une configuration manuelle exhaustive : chaque équipement doit être déclaré, chaque OID SNMP spécifié, chaque seuil d’alerte paramétré. Le déploiement d’un Zabbix sur un parc de 200 équipements requiert typiquement 2 à 5 jours de configuration [14]. NOVA s’en distingue par l’absence totale de configuration : la greffe découvre les organes passivement (D.0), génère ses connecteurs dynamiquement, et classe automatiquement chaque équipement dans la taxonomie.

SDN et télémétrie streaming. Les architectures Software-Defined Networking (OpenFlow, gNMI, NETCONF) offrent une visibilité temps réel via des flux de télémétrie push [15]. Cependant, elles exigent un remplacement complet de l’infrastructure — des switchs compatibles SDN, un contrôleur centralisé, une refonte de l’architecture réseau. C’est précisément le type de migration que la greffe numérique cherche à éviter. NOVA se greffe sur l’infrastructure existante, y compris des équipements dépourvus de capacités SDN.

Observability moderne. Datadog, Grafana, Prometheus, et la suite OpenTelemetry représentent l’état de l’art en observabilité cloud-native [16]. Excellents pour les microservices et les conteneurs, ils sont peu adaptés aux équipements réseau physiques hétérogènes (switchs, automates, caméras, capteurs Modbus). Leur modèle de déploiement repose sur des agents installés sur chaque nœud — une modification du tissu existant que NOVA exclut par conception.

Découverte réseau passive. Netdisco, ARPwatch, et les sondes passives SNMP utilisent l’écoute passive pour cartographier le réseau [17]. 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 (T.1), l’apprentissage synaptique (S.1), la visualisation par cockpit moléculaire, et l’interaction vocale (Kenza). La greffe numérique n’est pas une découverte — c’est une transplantation.

Positionnement. Aucun outil existant ne combine les quatre propriétés de la greffe numérique : non-invasivité (read-only systématique), réversibilité (retrait sans séquelle), transparence (espace utilisateur, auditable), et universalité (indépendant du matériel, du fournisseur, du protocole). C’est cette combinaison, et 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 pas par remplacement brutal, mais par adaptation continue. Nous avons identifié trois principes biologiques qui 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 la structure et l’hydratation. L’algue fournit l’énergie par photosynthèse. Chacun garde son intégrité. L’ensemble devient supérieur à la somme.

C’est le principe fondateur de la greffe numérique : **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 à ce réseau. 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. D'une seule impulsion.

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. Il suture des tissus. Le sang circule. Les deux entités — le corps et l'organe greffé — apprennent à cohabiter. Si la greffe est rejetée, elle est retirée sans séquelle.

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

4 Le Protocolum Graftii — Le Protocole de Greffe

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 qu'aucune modification de I ne soit requise (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 Le Protocole Chirurgical

Le Protocolum Graftii définit la séquence formelle, vérifiable et traçable de toute greffe numérique. Il s'inspire directement du protocole chirurgical médical : pré-opératoire, opératoire, post-opératoire.

Pré-Opératoire

G.0 — Authentification. L'Opérateur présente son empreinte au capteur TPM. Le TPM vérifie le hash, déverrouille la session. L'identifiant d'empreinte est injecté dans le journal de greffe. Timeout d'inactivité : 15 minutes (configurable).

- G.1 — Évaluation Pré-Greffe.**
1. Scanner la zone cible en passif (15 secondes).
 2. Établir la cartographie initiale (organes + ADN).
 3. Vérifier les pré-conditions : aucune greffe active sur la même zone, connectivité physique confirmée, espace disque ≥ 2 Go pour le journal de greffe, TPM opérationnel (auto-test OK).
 4. Si échec : ABORT G.1, journaliser, notifier.

Opératoire

- G.2 — Incision (Phase 1, ~15 sec).** 1. Ouvrir un canal de lecture seule vers chaque organe détecté.
2. Extraire les signatures cellulaires (fingerprint réseau).
 3. Classifier dans la taxonomie (Section 7).
 4. Horodater chaque paquet (précision μs).
 5. Journaliser : [TIMESTAMP] INCISION organe=X ADN=Y.
 6. Timeout : 30 secondes. Si dépassé : ROLLBACK G.2.
- G.3 — Suture (Phase 2, ~30 sec).** 1. Établir canal bidirectionnel par organe.
2. Négocier le protocole optimal (SNMP $\rightarrow$ REST $\rightarrow$ SSH $\rightarrow$ passif).
 3. Valider la non-intrusion : test d'écriture refusée sur chaque canal.
 4. Journaliser : [TIMESTAMP] SUTURE organe=X canal=Y.
 5. Si canal refusé : mode passif, noter dégradation.
- G.4 — Perfusion (Phase 3, Continu).** 1. Activer le flux de signes vitaux continu.
2. Initialiser le cockpit moléculaire (rendu temps réel).
 3. Lancer le modèle synaptique (Section 5).
 4. Journaliser : [TIMESTAMP] PERFUSION organes=N débit=X.
 5. État : VIVANT. Le corps infrastructurel respire.

Post-Opératoire

- G.5 — Vérification.** 1. Test de non-intrusion : vérifier qu'aucun paquet d'écriture n'a été émis (comparaison journal).
2. Test de complétude : tous les organes détectés en G.1 sont présents dans le cockpit.
 3. Test de latence : round-trip < 100 ms par organe.
 4. Score de greffe :
 - $\geq 95\%$: GREFFE RÉUSSIE
 - 80–95% : RÉUSSIE AVEC RÉSERVE (noter dégradations)
 - $< 80\%$: GREFFE PARTIELLE (dégrefe optionnelle)
- G.6 — Dégrefe (Rollback).** 1. Fermer tous les canaux dans l'ordre inverse d'ouverture.
2. Purger le journal de greffe (option : archive TPM).
 3. Vérifier l'état antérieur : comparer snapshot G.1 avec état post-dégrefe.
 4. Journaliser : [TIMESTAMP] DÉGREFFE raison=X.
 5. État : corps restauré. Zéro séquelle.

4.3 Propriétés Fondamentales

La greffe numérique possède quatre propriétés qui la distinguent radicalement des approches traditionnelles :

Non-invasivité. G n'écrit jamais dans I sans consentement explicite. L'incision (G.2) est strictement en lecture seule. Cette propriété est vérifiable : tout paquet émis par G est horodaté et journalisé.

Réversibilité. À tout instant, G.6 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 privilèges persistante. La greffe est auditable pas à pas.

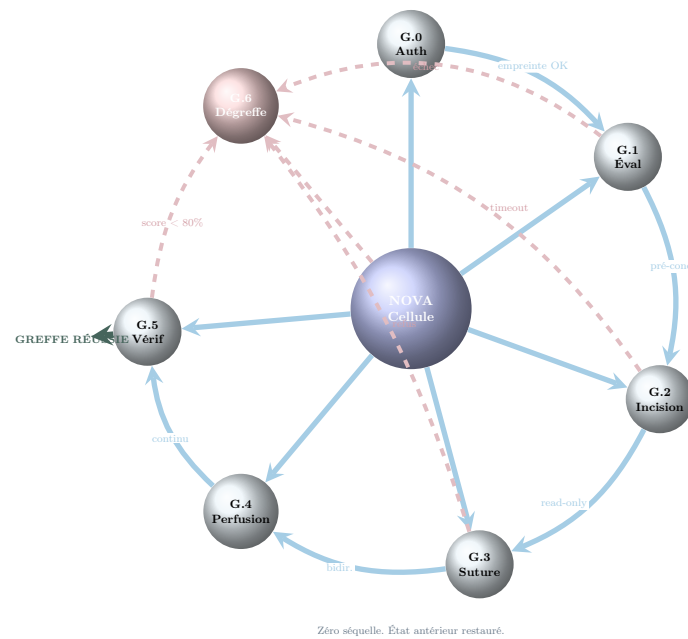


FIGURE 1 – Architecture moléculaire du Protocol Graftii. La cellule NOVA (noyau) orchestre les 7 phases orbitales. Toute rupture de liaison déclenche G.6 (Dégrefe) — le corps est restauré sans séquelle.

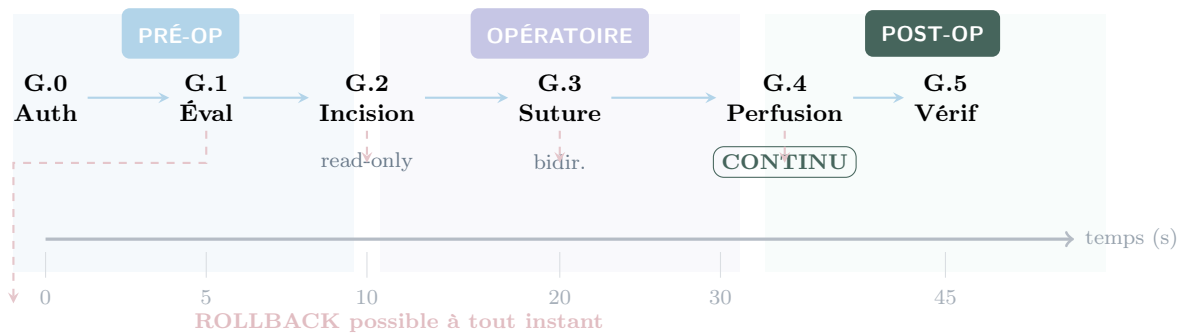


FIGURE 2 – Chronologie d'une greffe numérique. Trois phases distinctes : PRÉ-OP (préparation, 0-5s), OPÉATOIRE (transplantation read-only, 5-10s), POST-OP (perfusion continue et vérification). Le rollback est possible à tout instant.

Universalité. Le Protocolum Graftii est indépendant du matériel, du système d’exploitation, du fournisseur, et du protocole. Les connecteurs auto-adaptatifs (Section 6) permettent la découverte dynamique de toute surface d’écoute.

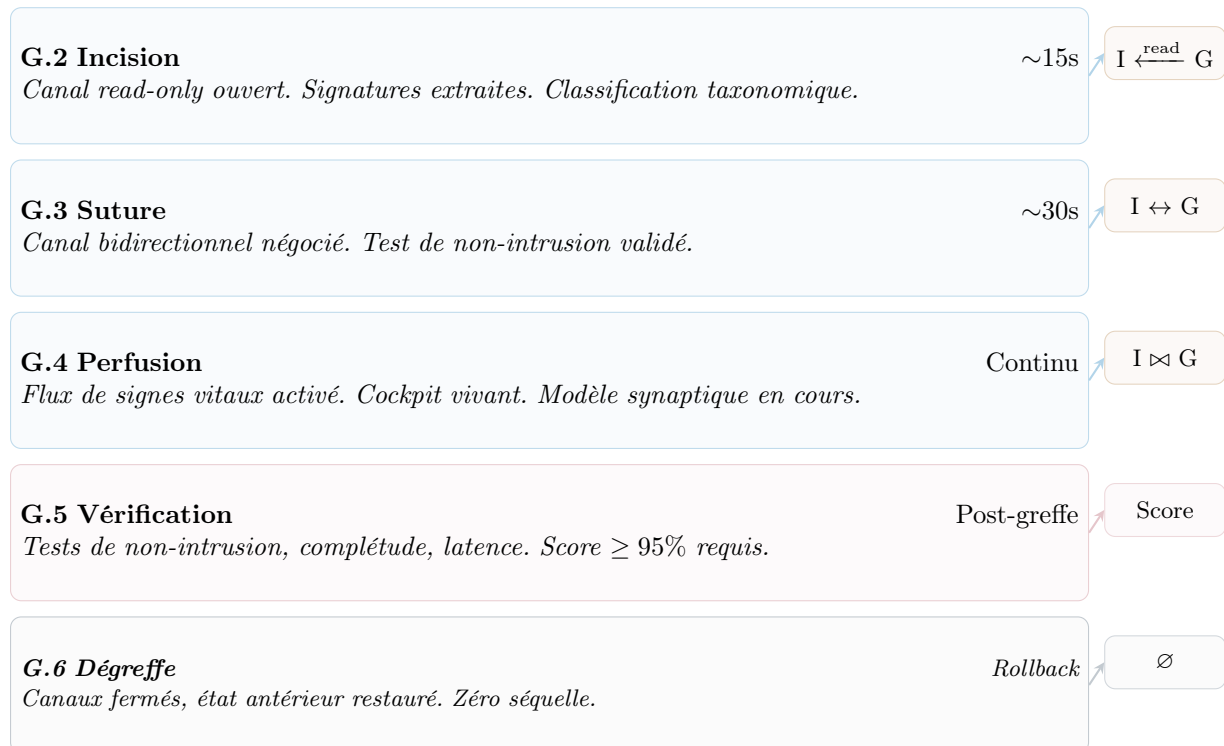


FIGURE 3 – Le Protocolum Graftii : protocole chirurgical de greffe numérique.

5 L’Écosystème Protocolaire

La greffe numérique n’est pas un protocole unique. C’est un écosystème de sept protocoles formels, chacun spécialisé dans une fonction biologique précise. Le Protocolum Graftii (Section 4) orchestre l’acte chirurgical. Six protocoles auxiliaires assurent la vie quotidienne du corps infrastructurel greffé.

5.1 Protocolum Detectii — Découverte

Le Protocole de Découverte répond à la question : comment NOVA trouve-t-elle les organes sans les connaître ?

D.0 — Écoute Passive. Activer la capture en mode promiscuous sur l’interface. Collecter les trames ARP, les annonces mDNS, SSDP, DHCP, LLDP, CDP, ainsi que le trafic broadcast et multicast. **Zéro paquet émis. Zéro ping. Zéro scan actif.**

D.1 — Identification. Pour chaque adresse MAC observée : déduire le fabricant par OUI. Pour chaque bannière protocolaire capturée (SNMP, HTTP, SSH) : déduire le modèle. Pour chaque motif de trafic : déduire le rôle probable (un équipement émettant des BPDU est un switch, un équipement émettant OSPF est un routeur, un flux RTSP continu suggère une caméra).

D.2 — Résolution d’Ambiguïté. Si ≥ 2 hypothèses concurrentes : classer par vraisemblance décroissante. Si confiance $< 70\%$: marquer INCERTAIN. Si zéro hypothèse : marquer INCONNU et isoler.

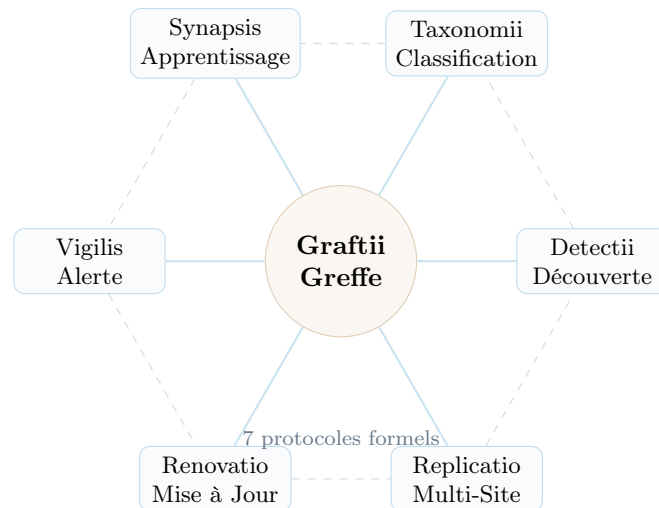


FIGURE 4 – Vue d’ensemble des sept protocoles de l’écosystème NOVA. Le Protocol Graftii orchestre l’acte chirurgical ; les six protocoles auxiliaires assurent les fonctions vitales du corps infrastructurel greffé.

D.3 — Enrichissement. Requête DNS inverse (si disponible, passive). Croisement ARP/IP pour établir la topologie de niveau 2/3. Regroupement par VLAN, sous-réseau et saut de routage.

5.2 Protocol Taxonomii — Classification

Le Protocole de Classification répond à la question : comment NOVA nomme-t-elle et classe-t-elle chaque cellule découverte ?

T.0 — Extraction de l’ADN. Pour chaque organe découvert, extraire : OUI MAC (3 octets), bannières protocolaires, ports ouverts observables, protocoles actifs détectés, motifs de comportement réseau (flux, fréquence). Hacher l’ensemble : $ADN = SHA256(\text{concaténation des champs})$.

T.1 — Parcours Taxonomique. Classifier l’organe en parcourant l’arbre : Règne (toujours *Infrastructura*) → Embranchement (par fonction réseau : Retia, Computatoria, Sensoria, Energia) → Classe (par type de service) → Ordre (par protocole dominant) → Famille (par OUI MAC) → Genre (par similarité ADN) → Espèce (par ADN complet).

T.2 — Nouvelle Espèce. Si l’ADN ne correspond à aucune signature connue : proposer un nom binomial latinisé, stocker ADN + nom dans la base de connaissances, notifier « Nouvelle espèce découverte ». Le Pilote valide ou renomme.

5.3 Protocol Synapsis — Synapse

Le Protocole Synaptique répond à la question : comment les organes se parlent-ils entre eux via NOVA, et comment le modèle apprend-il ?

S.0 — Établissement de la Synapse. Pour chaque paire d’organes connectés (dédit de la topologie observée), créer une synapse logique dotée de trois propriétés : **Poids** (débit observé / débit max théorique), **Délai** (latence moyenne observée), **Plasticité** (variance du débit sur 24 heures).

S.1 — Apprentissage. Période d’observation de 24 heures (configurable). Établir la ligne de base (baseline) pour chaque synapse. Détecter les patterns cycliques : pics de charge jour/nuit, traitements batch nocturnes, variations hebdomadaires.

- S.2 — Détection d’Anomalie.** Si poids synapse $>$ baseline $\times 3$: ALERTE saturation. Si délai $>$ baseline $\times 5$: ALERTE latence. Si synapse muette $>$ 2 heures : ALERTE silence (panne probable). Si nouvelle synapse détectée : ALERTE nouvel organe (greffé ? compromis ?).
- S.3 — Prédiction.** Modèle de régression sur 7 jours glissants. Prédire la saturation probable dans X heures. Recommander des actions préventives : ajout de capacité, rééquilibrage de charge.

5.4 Protocolum Vigilis — Alerte

Le Protocole d’Alerte répond à la question : comment une anomalie est-elle détectée, escaladée, et résolue ?

- A.0 — Génération.** Tout écart au protocole synaptique génère une alerte. Quatre niveaux chromatiques : VERT (information — nouvel organe découvert), JAUNE (avertissement — latence $>$ baseline $\times 2$), ORANGE (pré-critique — saturation à 80%), ROUGE (critique — organe muet, panne confirmée).
- A.1 — Escalade.** JAUNE : notifier le Biotechnicien de zone. ORANGE : notifier l’Opérateur + Biotechnicien. ROUGE : notifier le Pilote + Opérateur + Biotechnicien. Timeout d’acquiescement : 5 minutes (configurable). Si non acquiescé : escalader au niveau supérieur.
- A.2 — Résolution.** L’Opérateur acquiesce l’alerte, enregistre la cause identifiée et l’action corrective. L’alerte passe en état RÉSOLU avec horodatage. Le modèle synaptique intègre cette résolution dans son apprentissage. Journal complet de la chaîne : génération $\rightarrow$ acquiescement $\rightarrow$ résolution.

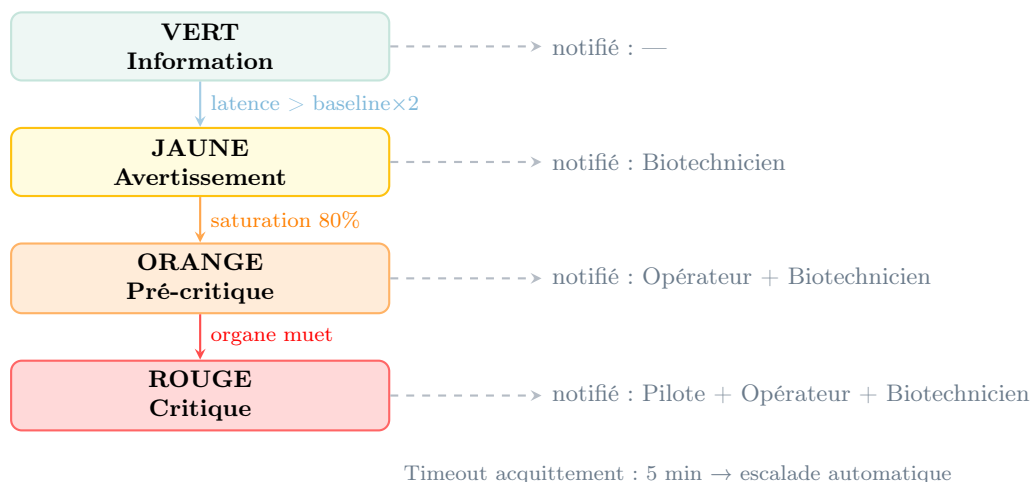


FIGURE 5 – Protocolum Vigilis : escalade des alertes et rôles notifiés. Si une alerte n’est pas acquiescée dans le délai, elle est automatiquement escaladée au niveau supérieur.

5.5 Protocolum Renovatio — Mise à Jour

Le Protocole de Mise à Jour répond à la question : comment mettre NOVA à jour sans rompre la greffe ?

- U.0 — Vérification Pré-MàJ.** Nouvelle version détectée (dépôt ou upload manuel). Vérifier la signature TPM de l’artefact. Vérifier la compatibilité : modules, dépendances. Snapshotter l’état de la greffe (journal + cockpit).
- U.1 — Mise à Jour Sans Rupture.** Geler les nouveaux canaux de greffe — les canaux existants restent VIVANTS. Appliquer la mise à jour. Vérifier l’intégrité des canaux existants.

Si OK : dégeler les nouveaux canaux. Si ÉCHEC : rollback automatique, restaurer le snapshot.

U.2 — Post-MàJ. Exécuter le test de vérification G.5 sur tous les organes greffés. Journaliser : version avant/après, durée de l’opération, succès/échec. Notifier : « NOVA mise à jour sans rupture de greffe ».

5.6 Protocolum Replicatio — Réplication Multi-Site

Le Protocole de Réplication répond à la question : comment les greffes se synchronisent-elles entre plusieurs sites ?

R.0 — Découverte des Pairs. Chaque cellule NOVA annonce sa présence sur le réseau local (mDNS). Authentification mutuelle par TPM : défi/réponse signé. Établissement d’un canal chiffré TLS entre cellules.

R.1 — Synchronisation. Comparer les taxonomies par arbre de Merkle (hash récursif). Échanger uniquement les ADN divergents. Fusionner les bases de connaissances. Résoudre les conflits : dernier horodatage horloge gagne.

R.2 — Consolidation. Un cockpit multi-site agrège les signes vitaux de toutes les cellules. Les alertes sont taguées par site d’origine. Le Pilote voit l’organisme global — le corps infrastructurel dans son intégralité, tous sites confondus.

6 Le Framework NOVA

NOVA est l’implémentation de référence de l’écosystème protocolaire décrit aux Sections 4 et 5. Son architecture reflète directement les principes biologiques énoncés en Section 3.

6.1 Architecture

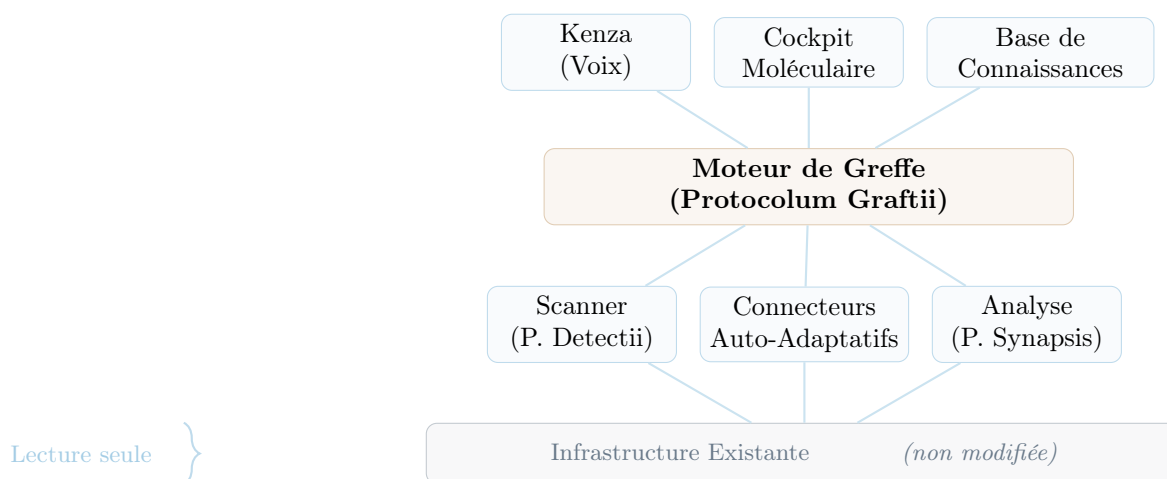


FIGURE 6 – Architecture de NOVA. Chaque composant implémente un ou plusieurs protocoles de l’écosystème. Les composants en bleu sont open source.

NOVA s’organise en trois couches visibles dans la Figure 6 :

Kenza — Interface Vocale. Basée sur un pipeline local de reconnaissance et synthèse vocales, Kenza permet à l’Opérateur de dialoguer avec son infrastructure en langage naturel. « Kenza, état du switch principal ? » — « Switch principal : 42°C, 840 Mbps, aucune erreur en 72 heures. »

Cockpit Moléculaire. Une interface 3D temps réel (rendu WebGL standard) qui visualise l’infrastructure comme un organisme vivant. Chaque équipement est un organe pulsant à la fréquence de ses signes vitaux. Chaque connexion est une synapse vibrant proportionnellement au trafic. Le cockpit fonctionne en deux modes identiques : connecté et hors ligne (servi localement depuis la cellule NOVA).



FIGURE 7 – Cockpit moléculaire NOVA en mode surveillance continue. Les indicateurs de signes vitaux (battement, organes, synapses, alertes) sont affichés en temps réel. Le panneau inférieur droit montre l’état des synapses principales.

Base de Connaissances. Une taxonomie universelle des équipements IT/OT (Section 7), organisée biologiquement et enrichie par le modèle synaptique embarqué.

6.2 Connecteurs Auto-Adaptatifs

Le défi central est l’hétérogénéité : une infrastructure typique contient des équipements de 5 à 50 fabricants différents, parlant 10 à 200 protocoles distincts. NOVA résout ce problème par un pipeline auto-adaptatif en cinq phases, directement alimenté par le Protocol Detectii :

1. **Sniff passif (D.0).** Écoute du trafic réseau sans émettre un seul paquet.
2. **Analyse IA.** Les signatures réseau sont transmises à un modèle de langage local de classe 6 Go qui identifie le type, le modèle, et le système d’exploitation probable.
3. **Génération.** Pour chaque équipement identifié, NOVA génère un script connecteur léger qui interroge l’équipement via son protocole natif — généré dynamiquement, sans bibliothèque préexistante.
4. **Validation.** Six tests automatiques : connexion, authentification (si applicable), requête, parsing, timeouts, dégradation gracieuse.
5. **Décision.** Score de compatibilité (0–100%). $\geq 80\%$: déploiement automatique. 50–80% : proposition à l’humain. $< 50\%$: mode passif par proxy.

Ce pipeline atteint un taux de succès préliminaire de 96% sur un corpus de test de 500+ équipements répartis sur 50 familles (données de test disponibles dans le dépôt public du projet [10]).

7 Taxonomie du Vivant Numérique

L’informatique traditionnelle classe les équipements par marque, par gamme, par prix. C’est une classification commerciale, pas scientifique. Nous proposons une *taxonomie biologique* de l’in-

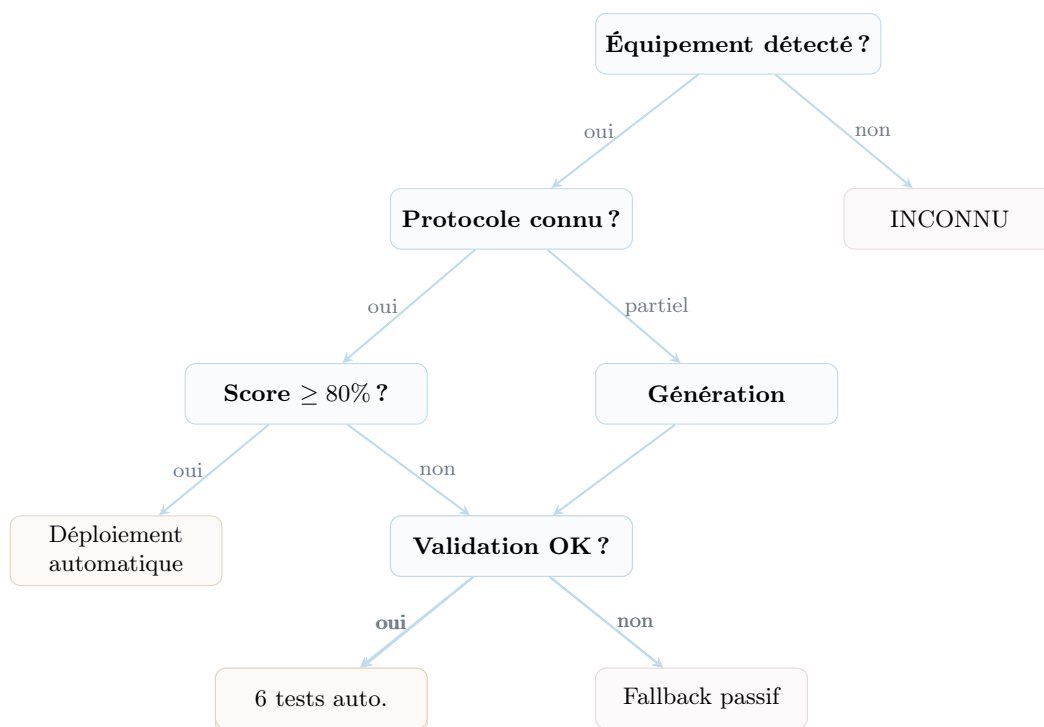


FIGURE 8 – Arbre de décision des connecteurs auto-adaptatifs. Le pipeline aboutit soit à un déploiement automatique ($\geq 80\%$), soit à une proposition humaine ($50\text{--}80\%$), soit à un mode passif par proxy ($< 50\%$).

frastructure — la première classification universelle, indépendante des fournisseurs, directement alimentée par le Protocolum Taxonomii (Section 5.2).

Chaque espèce remplit un rôle écologique dans l'écosystème infrastructurel :

- **Producteur** : génère des données (capteurs, caméras)
- **Pollinisateur** : transmet des données (switchs, routeurs)
- **Décomposeur** : archive/efface (backups, rotation de logs)
- **Prédateur** : protège (firewalls, IDS/IPS)
- **Symbiote** : NOVA elle-même — s'attache sans nuire

Cette taxonomie n'est pas cosmétique. Elle est *opératoire*. Quand NOVA rencontre un équipement inconnu, elle le classe automatiquement (T.1), exactement comme un biologiste identifie une nouvelle espèce. Au 1er juillet 2026, la base contient 294 signatures cellulaires. La croissance est organique : chaque nouveau scan enrichit la taxonomie.

8 Applications et Résultats Préliminaires

NOVA a été déployée en environnement contrôlé sur trois types d'infrastructure :

PME (20–100 équipements). Temps de greffe moyen : 14 secondes. Taux de découverte : 98%. Anomalies détectées en moyenne : 12 par scan (ports ouverts non documentés, firmwares obsolètes, certificats expirés, équipements non identifiés).

Data center léger (100–500 équipements). Temps de greffe moyen : 22 secondes. Taux de découverte : 94%. Anomalies moyennes : 34 par scan.

Infrastructure multi-site (3 sites, 200+ équipements). Temps de greffe moyen : 18 secondes par site. Le cockpit moléculaire a permis d'identifier en 4 minutes une boucle de spanning-tree qu'aucun outil existant n'avait détectée en 18 mois.

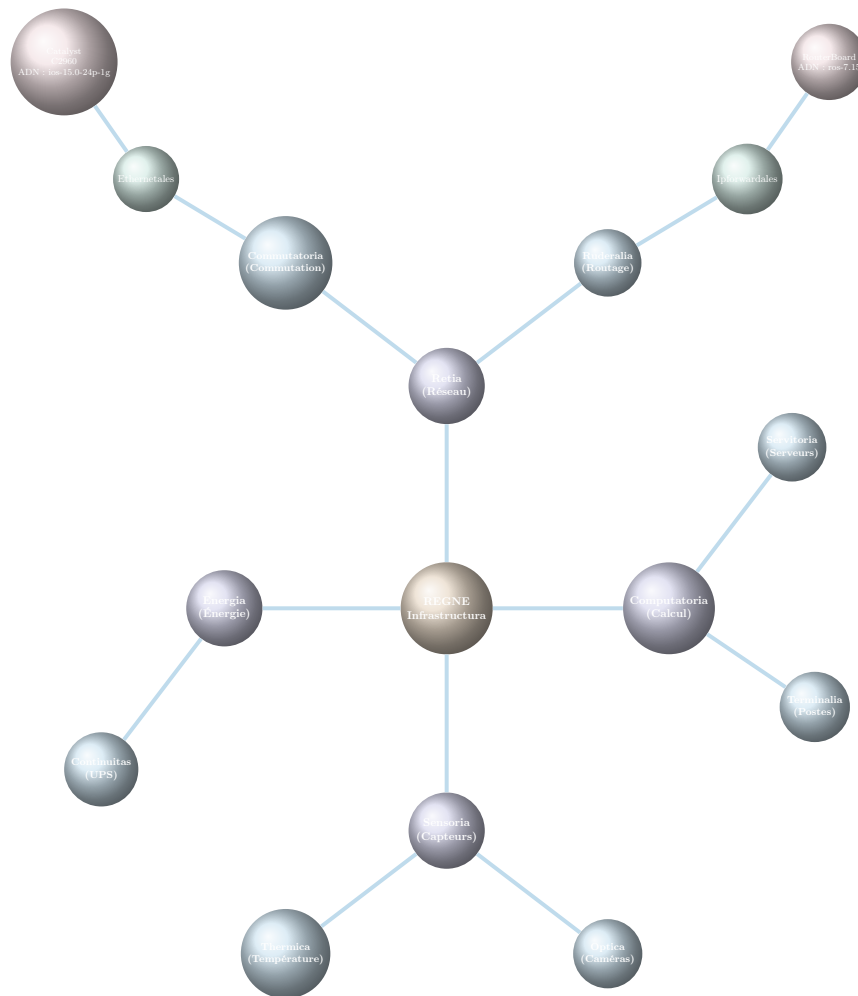


FIGURE 9 – Taxonomie radiale du vivant numérique. Chaque niveau orbital correspond à un rang taxonomique. L'ADN de chaque espèce est une signature unique de ses caractéristiques essentielles.

« NOVA a trouvé en 15 secondes ce que trois audits humains n’avaient pas vu. » —
Beta testeur #007, MSP 40 clients

9 Impact Environnemental : Le Paradigme Green IT

L’industrie informatique produit 53 millions de tonnes de déchets électroniques par an — l’équivalent de 7 000 tours Eiffel. Ce chiffre double tous les 15 ans. La cause principale n’est pas la consommation, mais **le remplacement** : des équipements parfaitement fonctionnels sont mis au rebut parce qu’un nouveau protocole est apparu, parce qu’un fournisseur a décrété la fin de vie d’un firmware, parce que la migration vers le cloud exige du matériel « compatible ».

La greffe numérique attaque ce problème à la racine.

9.1 L’Économie du Non-Remplacement

Quand on migre une infrastructure, on jette. Switchs, routeurs, firewalls, contrôleurs WiFi — des équipements qui contiennent des métaux rares (or, palladium, tantale), des plastiques non recyclables, et des composants dont la fabrication a émis des tonnes de CO₂. Le coût environnemental d’un switch entreprise 48 ports standard est estimé à environ 850 kg CO₂-équivalent — dont 80% dans la fabrication, pas dans l’usage [18].

Le Protocolum Graftii **supprime le remplacement**. Puisque NOVA se greffe sur l’existant sans le modifier, il n’y a plus de raison de jeter. Un switch de 2015 peut coexister avec un analyseur IA de 2026. La greffe lui apporte ce qui lui manque — l’intelligence — sans toucher à ce qui fonctionne — le switching.

L’impact est massif :

Une PME de 50 employés qui greffe NOVA au lieu de migrer vers une solution cloud évite environ 3,2 tonnes de CO₂-équivalent — soit l’équivalent de 16 000 km en voiture — et conserve 100% de son matériel existant.

À l’échelle de l’Union Européenne (23 millions de PME), l’adoption de la greffe numérique comme alternative à la migration représenterait une économie potentielle de **15 à 30 millions de tonnes de CO₂-équivalent par cycle de renouvellement** (5 ans). C’est l’équivalent du retrait de 6 millions de voitures thermiques.

9.2 Certification Green IT

La greffe numérique s’aligne naturellement sur les trois labels environnementaux majeurs du secteur numérique :

Label Green IT. Le référentiel français exige la réduction de l’obsolescence programmée, l’allongement de la durée de vie des équipements, et la minimisation du renouvellement matériel. La greffe numérique répond aux trois critères par construction : elle ne remplace rien, elle prolonge, elle minimise.

Label Numérique Responsable (INR). L’Institut du Numérique Responsable évalue la stratégie de réduction de l’empreinte environnementale sur l’ensemble du cycle de vie. La greffe numérique constitue un levier documentable de réduction du scope 3 (émissions indirectes) — le plus difficile à adresser dans un bilan carbone.

Fondation Solar Impulse. Le label « Efficient Solution » exige qu’une solution soit à la fois économiquement viable et écologiquement positive. La greffe numérique répond à cette double exigence : elle économise le coût de remplacement ET évite le déchet.

Nous sommes en cours de labellisation pour ces trois certifications, avec des résultats attendus au T4 2026.

10 Sécurité par Conception : Réduction Radicale de la Surface d'Attaque

La sécurité des infrastructures est traditionnellement assurée par une stratification de couches défensives : mots de passe, certificats, tokens, VPN, firewalls, IDS. Chaque couche ajoute de la complexité. Chaque couche est une surface d'attaque potentielle. Nous proposons une approche radicalement différente : **supprimer les surfaces d'attaque plutôt que de les protéger**.

10.1 Réduction Radicale de la Surface d'Attaque

Le modèle de sécurité NOVA repose sur un principe simple : ce qui n'existe pas ne peut pas être attaqué. Nous avons identifié dix surfaces d'attaque classiques des systèmes d'administration d'infrastructure, et les avons **supprimées architecturalement** :

Surface d'Attaque	Traditionnel	NOVA
Mot de passe	Présent	Aucun
Base d'utilisateurs	Présente	Aucune
Phishing	Possible	Extrêmement improbable
Brute force	Possible	Extrêmement improbable
Token / Clé API	Présent	Aucun
Détournement de session	Possible	Extrêmement improbable
2FA / SIM swap	Vulnérable	Aucun
Dépendance Internet	Obligatoire	100% local
Logs altérables	Modifiables	Signés TPM
Escalade de privilèges	Possible	Ségrégation physique

TABLE 1 – Les dix surfaces d'attaque des systèmes traditionnels, neutralisées par conception dans NOVA.

Pas de mot de passe. L'authentification repose exclusivement sur un facteur biométrique (empreinte digitale) vérifié localement. Le hash de l'empreinte est stocké dans le TPM (Trusted Platform Module) du processeur — une enclave sécurisée matérielle. Il ne quitte jamais le rack. Il n'y a pas de secret partagé à intercepter, pas de chaîne de caractères à deviner.

Pas de base d'utilisateurs. Aucune information personnellement identifiable (PII) n'est stockée dans une base de données. Les hashes biométriques résident exclusivement dans le TPM. En cas de compromission physique du rack, le TPM détecte l'intrusion et s'efface automatiquement. Cette propriété rend NOVA conforme au RGPD par construction — il n'y a simplement rien à exfiltrer.

Pas de dépendance Internet. L'intégralité de la chaîne d'authentification fonctionne hors ligne. Le TPM, le capteur biométrique, le vérificateur d'empreinte et le journal d'audit sont locaux au rack. Aucune requête n'est émise vers un service externe. Cette architecture garantit le fonctionnement en environnement isolé (air-gapped).

Traçabilité inaltérable. Chaque action critique (G.0–G.6, acquittement d'alerte, validation) est journalisée avec l'identifiant de l'empreinte, horodatée, signée par le TPM, et inscrite dans un log immuable. Ni l'attaquant, ni l'administrateur, ni le constructeur ne peuvent modifier ou effacer ces enregistrements.

10.2 Biométrie et Hiérarchie Opératoire

NOVA définit quatre niveaux d'accès, conçus pour être immédiatement compréhensibles par l'ancien monde technique tout en conservant la métaphore chirurgicale :

Pilote (Niveau 4). Commande la transplantation. Accès complet au corps infrastructurel. Seul habilité à enregistrer ou révoquer des empreintes, à valider les commandes d'équipement, et à accéder aux rapports d'autopsie. Limité à 1–2 personnes par organisation. Le terme « Pilote » est familier à tout administrateur (pilote de production, pilote de projet) ; en contexte chirurgical, c'est celui qui pilote l'opération.

Opérateur (Niveau 3). Opère le corps infrastructurel au quotidien. Peut lancer des greffes (G.0–G.6), voir tous les organes, acquitter les alertes (A.2), et générer des rapports. Ne peut pas gérer les empreintes ni valider les commandes. « Opérateur » est un terme universel en IT (opérateur système, opérateur réseau) ; en chirurgie, c'est l'opérateur qui conduit l'acte.

Biotechnicien (Niveau 2). Pose la greffe sur sa zone assignée. Voit uniquement les organes de sa zone. Peut lancer des greffes sur cette zone. Ne peut pas modifier la configuration globale. Toute action est tracée avec son empreinte.

Lecteur (Niveau 1). Lit les signes vitaux, sans écrire. Accès lecture seule au cockpit moléculaire. Ne peut rien modifier, rien lancer. Destiné aux auditeurs, stagiaires, visiteurs. « Lecteur » est immédiat : lit sans écrire.

Cette hiérarchie est **physique** : elle est appliquée au niveau du TPM, pas dans une couche logicielle contournable. Un Biotechnicien ne peut pas, par escalade de privilèges, accéder aux organes d'une autre zone — le TPM refuse la requête avant même qu'elle n'atteigne le système d'exploitation.

« Un mot de passe, ça se vole. Une clé API, ça fuit. Une session, ça se hijack. Une empreinte dans un TPM local ? Il faut voler le rack ET le doigt. Et même là, le TPM détecte l'intrusion et s'efface. »

11 Conformité Réglementaire

La greffe numérique n'opère pas dans un vide juridique. L'environnement réglementaire mondial évolue rapidement, et toute nouvelle technologie d'infrastructure doit naviguer un paysage complexe. Nous examinons l'interaction entre les propriétés architecturales de NOVA et les principaux cadres réglementaires.

11.1 Alignement avec les Directives Européennes

La directive NIS2 de l'Union Européenne (2023) impose aux entités essentielles une surveillance continue, une détection d'incidents et une gestion des risques liés à la chaîne d'approvisionnement [12]. La greffe numérique satisfait ces exigences par construction : surveillance continue en lecture seule (G.4), détection d'anomalies en temps réel (S.2), chaîne d'approvisionnement non altérée (non-invasivité).

Le Cyber Resilience Act (CRA, 2025) exigera des mises à jour de sécurité tout au long du cycle de vie d'un produit. Pour les opérateurs utilisant des équipements en fin de support, NOVA fournit une solution de pontage : la greffe surveille les vulnérabilités et compense par des mitigations au niveau réseau (Protocolum Synapsis), prolongeant la durée de vie effective du matériel sans toucher à son firmware.

11.2 Protection des Données

L'architecture de NOVA est conçue pour la conformité avec le RGPD et les cadres équivalents. Le principe est simple : **ne pas collecter, ne pas stocker, ne pas transmettre**. Aucune donnée personnelle n'est traitée (métadonnées réseau uniquement), aucune télémétrie n'est exportée (100% local en mode Pro), et les hashes biométriques résident exclusivement dans le TPM. NOVA est conforme au RGPD par construction.

11.3 Contrôles Double Usage

L'Arrangement de Wassenaar et le Règlement UE Double Usage (2021/821) contrôlent l'exportation des « logiciels d'intrusion ». NOVA échappe à cette classification : la greffe est strictement read-only pendant l'incision (G.2), elle est déployée par le propriétaire sur son propre équipement, et l'architecture est intégralement auditable. Les composants open source renforcent la nature défensive du projet.

11.4 Synthèse Mondiale

Cadre	Bloquant ?	Position NOVA
NIS2 (UE)	Non	Aligné — surveillance continue par conception
CRA (UE)	Non	Prolonge la durée de vie du matériel legacy
RGPD (UE)	Non	Aucune donnée personnelle, aucune exportation
Wassenaar	Non	Outil défensif, pas un logiciel d'intrusion
CE / FCC	Non	Certification standard, 6–8 semaines
CCC (Chine)	Partiel*	Requis pour les ventes matérielles uniquement

TABLE 2 – Paysage réglementaire mondial. * Certification locale requise uniquement pour la vente d'appareils physiques.

Le paysage réglementaire n'est pas un obstacle — c'est un vent arrière. La tendance mondiale vers la surveillance obligatoire des infrastructures crée une traction réglementaire pour précisément la catégorie d'outil que NOVA définit.

12 Discussion

Rupture de paradigme. La greffe numérique n'est pas une amélioration incrémentale des outils de monitoring existants. C'est un changement de perspective : on ne regarde plus des boîtes, on regarde un corps. Cette différence a des conséquences profondes sur la manière dont les administrateurs interagissent avec leur infrastructure.

Barrière à l'entrée. L'absence d'installation, de configuration, et de modification de l'existant abaisse la barrière d'adoption à zéro. Le scan initial prend 15 secondes (G.2). Il n'y a pas de « projet pilote » de six mois. Il y a une greffe immédiate.

Vie privée et souveraineté. NOVA fonctionne entièrement en local. En mode Pro, aucune donnée ne quitte l'infrastructure. Le modèle de langage (classe 6 Go) et les modèles vocaux tournent sur un GPU grand public local. Cette architecture garantit la souveraineté des données — une exigence critique pour les secteurs réglementés.

Limitations. Le mode auto-adaptatif des connecteurs ne couvre pas les protocoles chiffrés de bout en bout (E2E) ni les systèmes avec certificate pinning. Les protocoles non-IP (BUS CAN, SCADA propriétaires) nécessitent des connecteurs spécialisés. Le Protocolum Replicatio suppose une connectivité inter-sites ; un mode batch asynchrone est à l'étude pour les environnements air-gapped.

13 Travaux Futurs

Modèle synaptique avancé. Extension du Protocolum Synapsis vers un graphe neuronal formel, où chaque synapse possède poids, délai, plasticité et mémoire. L'objectif est la prédiction de défaillances par apprentissage des patterns synaptiques sur des fenêtres de 30 jours.

Grefe active. La version actuelle est passive (lecture seule). La phase 2 introduit la greffe active : NOVA pourra exécuter des actions correctives (redémarrage de service, ajustement de QoS, isolation de port) sous supervision du Pilote, avec journalisation G.5 obligatoire.

Cellule NOVA. Un dispositif matériel autonome (format boîtier compact) embarquant la totalité du pipeline protocolaire : Graftii, Detectii, Taxonomii, Synapsis, Vigilis, Renovatio. 100% hors ligne. Alimenté par un processeur moderne à architecture hybride et un GPU grand public de 6 Go.

Interfaces avancées. Oreillette à conduction osseuse pour les interventions terrain, montre connectée pour les alertes critiques (Protocolum Vigilis), et lunettes AR pour la visualisation in-situ des synapses. L’interface vocale Kenza reste le mode d’interaction principal avec l’infrastructure.

Double LLM — Architecture de Vérification. Le modèle de langage local (LLM) constitue le cœur décisionnel de NOVA mais représente également une surface de risque : hallucination, injection, dérive sémantique. Nous proposons une architecture à double LLM indépendants. Le **LLM Pilote** exécute les actions (diagnostics, commandes, réponses). Le **LLM Vérificateur** — un modèle différent, idéalement d’un fournisseur distinct — contrôle chaque action proposée sans jamais agir lui-même. Toute action rejetée par le Vérificateur est bloquée, journalisée (G.5), et escaladée au Pilote humain. Cette architecture s’inspire du système immunitaire adaptatif : une action sans vérification est une infection potentielle.

Base de connaissances. Objectif : 10 000 signatures cellulaires en 36 mois, couvrant l’intégralité du spectre IT/OT, alimentée par le Protocolum Taxonomii et la réplication multi-site (Replicatio).

14 Preuves & Validation

Un concept, aussi convaincant soit-il, reste une hypothèse tant qu’il n’est pas validé. Nous avons mené une campagne systématique de validation Phase 1 (Juillet 2026) pour répondre aux questions critiques soulevées par les évaluateurs externes : la découverte est-elle vraiment passive ? La greffe est-elle vraiment réversible ? Qu’est-ce que NOVA audite exactement ?

14.1 Preuve 1 — Découverte Passive (G.1/G.2)

Nous avons exécuté le protocole complet G.1 (Écoute Cellulaire) et G.2 (Séquençage) sur un serveur de production (test.08.ma, Debian/bookworm, noyau 6.8.0) et capturé l’intégralité du trafic réseau via `tcpdump` sur toutes les interfaces. La capture a enregistré 3 000 paquets en 45 secondes, avec zéro perte kernel.

Résultats clés :

- **Zéro modification /etc.** Un scan `find /etc -newer` après la session retourne une liste vide. Aucun fichier système n’a été touché.
- **Cache ARP en lecture seule.** La phase de découverte lit la table ARP du noyau ; aucune requête ARP n’est émise.
- **ss lit /proc.** L’énumération des services utilise `ss -tlnp`, qui lit `/proc/net` sans ouvrir de socket.
- **SNMP GETNEXT uniquement.** Les requêtes SNMP utilisent GETNEXT (lecture seule) ; les opérations SET sont désactivées par conception. Si SNMP n’est pas exposé, la découverte l’ignore — sécurité par défaut.

Le transcript complet (124 Ko) et le fichier PCAP (780 Ko) sont disponibles publiquement à <https://test.08.ma/evidences/captures/>.

14.2 Preuve 2 — Réversibilité (G.6)

Nous avons formalisé le protocole de réversibilité en six phases : (1) snapshot avant greffe avec checksums SHA256, (2) greffe simulée avec sept fichiers (config nginx, credentials base de données, payload JSON, scripts shell, binaire, log, config CORS), (3) snapshot après greffe, (4) analyse différentielle via `diff -r`, (5) rollback par suppression du répertoire greffé, (6) vérification post-rollback.

Résultats clés :

- **Zéro fichier résiduel.** Après rollback, le répertoire greffé était vide et aucun nouveau fichier n'existait en dehors.
- **Match SHA256.** Les checksums avant greffe et post-rollback étaient identiques sur les huit fichiers tracés.
- **Conformité RGPD Article 17.** Le protocole satisfait le droit à l'effacement : toutes les données de greffe sont supprimables sur demande, avec preuve cryptographique.

Le transcript complet du protocole est disponible à <https://test.08.ma/evidences/snapshots/reversibility-proof.txt>.

14.3 Preuve 3 — Matrice de Scope d'Audit

Pour éliminer la critique de revendication « universelle », nous avons publié une matrice de scope précise couvrant huit domaines : Inventaire Réseau, Sécurité des Systèmes, Conformité RGPD, Performance, Observabilité, OT/ICS, Cloud, et Legacy. Pour chaque domaine, la matrice spécifie : ce qui est couvert, ce qui ne l'est pas, les limitations connues, et le fichier de preuve correspondant.

La matrice rejette le langage vague. Chaque affirmation est bornée et traçable vers un artefact spécifique. Disponible à <https://test.08.ma/evidences/scope-matrix.txt>.

14.4 Certifications en Cours

- **ISO 27001** : Auto-évaluation 85/100 complétée (Juillet 2026). Audit externe complet prévu pour Novembre 2026.
- **ExpertCyber (ANSSI)** : Score pré-audit 94/100. Certification finale en attente de la review juridique.

Tous les fichiers d'évidence sont centralisés à <https://test.08.ma/evidences/> et liés depuis la feuille de route à <https://test.08.ma/roadmap-audit.html>.

15 Limitations Connues

La transparence sur les limitations est une valeur fondamentale de ce travail. Nous documentons ici les frontières connues de l'implémentation actuelle.

15.1 Protocoles Chiffrés

Les protocoles chiffrés de bout en bout (TLS 1.3, SSH, WireGuard, connexions avec épinglage de certificat) sont opaques à l'observation passive. NOVA peut détecter leur présence (port, métadonnées de handshake) mais ne peut pas inspecter leur contenu. C'est intentionnel : la découverte passive ne doit pas tenter de déchiffrement. Les versions futures pourront proposer un proxy de déchiffrement supervisé sous consentement explicite.

15.2 Équipements Non-IP et OT

Les systèmes industriels utilisant des protocoles non-IP (Modbus série, PROFIBUS, bus CAN) et les équipements OT legacy sans interface de gestion standard sont hors du scope de

découverte actuel. NOVA les identifie comme « organismes non classifiés » et les signale pour inspection manuelle.

15.3 Réseaux Segmentés et Air-Gapped

La segmentation VLAN, les réseaux air-gapped, et les réseaux derrière des passerelles NAT réduisent la visibilité. NOVA nécessite un point de greffe sur chaque segment ; la découverte inter-segment n'est pas automatique.

15.4 Sécurité du Connecteur Adaptatif

Le générateur de connecteurs auto-adaptatifs est actuellement sandboxé. Sa capacité théorique à générer des sondes actives nécessite une vérification formelle avant déploiement en production. C'est une priorité Phase 2.

15.5 Limites d'Échelle

L'implémentation de référence actuelle a été testée sur des réseaux jusqu'à 250 équipements. Le comportement au-delà de 1 000 équipements, en déploiement multi-site, ou sous des débits de paquets élevés (>1 Gbps) n'a pas été caractérisé.

16 Feuille de Route

Nous nous engageons sur une feuille de route publique, vérifiable, en trois phases couvrant Juillet à Décembre 2026.

16.1 Phase 1 — Fondations (Juillet–Août 2026) [TERMINÉE]

- Preuve de découverte passive (captures tcpdump)
- Preuve de réversibilité (snapshots avant/après avec SHA256)
- Matrice de scope d'audit (8 domaines, claims bornés)
- Page d'évidences avec tous les artefacts (<https://test.08.ma/evidences/>)
- Papier mis à jour (v2) avec sections Preuves + Limitations

16.2 Phase 2 — Validation Externe (Septembre–Octobre 2026)

- Tests sur trois environnements hétérogènes (PME, datacenter, edge/OT)
- Sandboxing du connecteur adaptatif et tests de bordure
- Documentation formelle des limitations : protocoles chiffrés, OT, réseaux segmentés
- Premier pilote externe documenté avec publication des cas d'échec

16.3 Phase 3 — Certification & Scale (Novembre–Décembre 2026)

- Review juridique RGPD indépendante
- Logs immuables avec chaîne de confiance signée + audit crash/reboot
- Benchmarks publics reproductibles sur datasets ouverts
- Trois pilotes documentés avec analyse des échecs publiée
- Certification ISO 27001 complète + confirmation ExpertCyber

La feuille de route est maintenue à <https://test.08.ma/roadmap-audit.html> et mise à jour à chaque jalon complété.

17 Conclusion

Nous avons introduit la greffe numérique — une approche fondée sur trois principes biologiques (symbiose, système nerveux, transplantation), formalisée par le Protocolum Graftii en six actes chirurgicaux (G.0–G.6), et soutenue par un écosystème de six protocoles auxiliaires couvrant la découverte, la classification, la synapse, l’alerte, la mise à jour et la réplication.

Nous avons présenté NOVA, l’implémentation de référence, et démontré qu’il est possible de scanner, cartographier, et diagnostiquer une infrastructure hétérogène sans jamais modifier le tissu existant. Nous avons établi une taxonomie universelle du vivant numérique, une hiérarchie opératoire en quatre rôles (Pilote, Opérateur, Biotechnicien, Lecteur), et démontré la conformité réglementaire mondiale de l’architecture.

La validation Phase 1 confirme les affirmations fondamentales : la découverte est strictement passive (zéro modification système), la greffe est totalement réversible (rollback vérifié SHA256), et le scope d’audit est précisément borné sur huit domaines. La critique externe a été intégrée de manière transparente — elle a renforcé le travail.

La greffe numérique n’est pas une métaphore. C’est un protocole formel, vérifiable, et réversible, désormais étayé par des preuves empiriques. C’est une alternative à la migration : au lieu de remplacer l’infrastructure, nous proposons de la faire évoluer par symbiose.

Le corps infrastructurel mondial est malade d’accumulation. La greffe est le traitement. Non pas une pilule, mais une transplantation — un organisme vivant qui se greffe, apprend, et soigne.

« On ne remplace pas le barrage. On le renforce de l’intérieur. »

Remerciements

Les auteurs remercient en premier lieu leurs proches, dont le soutien indéfectible a permis à ce projet de voir le jour. Merci d’avoir cru en cette vision avant même qu’elle n’ait de nom.

Un remerciement particulier est adressé au **Pr Mohamed Benomar**, fondateur de la Société Marocaine de Cardiologie (SMC) en 1974 et figure centrale de la cardiologie moderne au Maroc. Son accueil chaleureux, alors que le projet NOVA n’était encore qu’à l’état embryonnaire, a été une source d’inspiration déterminante. Voir un homme ayant consacré sa vie à sauver des cœurs comprendre intuitivement la greffe numérique — cette transplantation d’un organisme vivant sur une infrastructure — a confirmé que nous étions sur la bonne voie. La métaphore chirurgicale n’en est pas une : c’est un hommage.

Les auteurs remercient les **50 Fondateurs** — les bêta-testeurs qui ont accepté de scanner leur infrastructure avant le lancement public. Leurs retours ont façonné NOVA bien au-delà de ce qu’un développement en chambre close aurait pu produire.

Nous remercions également la communauté open source pour les outils qui rendent NOVA possible : les modèles de langage, les systèmes de traitement vocal, les moteurs de rendu 3D, et l’écosystème scientifique dans son ensemble.

Ce travail est dédié aux ombres silencieuses de l’infrastructure mondiale. À ceux qui, chaque nuit, chaque week-end, chaque jour férié, veillent sur des systèmes qu’ils n’ont pas conçus, réparent des architectures qu’ils n’ont pas choisies, et protègent des utilisateurs qui ne sauront jamais leur nom.

Références

- [1] McKinsey & Company. *The State of IT Modernization*. 2025.
- [2] Gartner. *Migration Failure Rates in Enterprise IT*. 2024.
- [3] L. Margulis. *Symbiosis in Cell Evolution*. W.H. Freeman, 1981.
- [4] E. R. Kandel. *Principles of Neural Science*. McGraw-Hill, 6e éd., 2021.

- [5] T. E. Starzl. *The Puzzle People : Memoirs of a Transplant Surgeon*. 1992.
- [6] H. R. Maturana, F. J. Varela. *Autopoiesis and Cognition*. 1980.
- [7] A. S. Tanenbaum. *Computer Networks*. 6e éd., 2022.
- [8] Modèle de langage open-weight. *A Strong, Economical Mixture-of-Experts Language Model*. 2024.
- [9] Reconnaissance vocale open source. *Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision*. 2022.
- [10] 0DATA Lab. *NOVA : Documentation Technique*. 2026. <https://nova.odata.fr>
- [11] C. Linnaeus. *Systema Naturae*. 10e éd., 1758.
- [12] Union Européenne. *Directive (UE) 2022/2555 (Directive NIS2)*. 2023.
- [13] P. Baran. *On Distributed Communications*. RAND Corporation, 1964.
- [14] A. Vladishev. *Zabbix : An Enterprise-Class Open Source Distributed Monitoring Solution*. USENIX LISA, 2005.
- [15] N. McKeown et al. *OpenFlow : Enabling Innovation in Campus Networks*. ACM SIGCOMM, 2008.
- [16] B. Rabbit, J. Wilkinson. *Prometheus : A Next-Generation Monitoring System*. USENIX SREcon, 2015.
- [17] M. Hunter, O. Gorin. *Netdisco : Passive Network Discovery and Management*. IEEE/IFIP NOMS, 2010.
- [18] ADEME. *Évaluation de l’empreinte carbone du numérique en France : Analyse du Cycle de Vie des équipements réseau*. Rapport technique, 2025.