



## ARTICLE 3 - De la maintenance planifiée à la maintenance prédictive : Pourquoi notre système intervient trop tard... par "construction"

16 décembre 2025

### [Partie 1] de l'Article 3 : Une possible architecture du système

#### (Série : « Déshérence et errance médicales » — Article 3-partie1-/5)

La médecine moderne repose sur une idée rassurante mais fautive :

« Si quelque chose ne va pas, le patient consultera. » (Enfin s'il/elle arrive à trouver une consultation idoine dans des délais raisonnables).

**C'est faux pour les maladies chroniques.** Et c'est faux depuis toujours.

Dans l'article 1, (<https://tinyurl.com/yh9e4995>) nous avons suivi André, 74 ans, diabétique et polypathologique, qui perd son médecin traitant en Tarentaise. Son cabinet est repris par de jeunes praticiens spécialisés en traumatologie de ski. Pour eux, André — trop complexe, trop chronophage, pas assez rentable — devient économiquement indésirable. Il bascule dans **la zone morte** : invisible au système, jusqu'à la décompensation.

Dans l'article 2 (<https://tinyurl.com/5h84xdnv>), nous avons déconstruit la mécanique qui fabrique cet abandon. Quatre rouages systémiques s'imbriquent pour rendre le suivi d'André structurellement impossible :

1. **Démographie** : -10% de médecins généralistes d'ici 2030 face à +22% de patients ALD

2. **Économie** : Le paiement à l'acte crée un ratio 1:3 en faveur des actes simples vs suivi complexe
3. **Complexité cognitive** : 3 750 points de vigilance à surveiller pour 250 patients polyopathologiques — cognitivement impossible
4. **Fragmentation** : Aucun orchestrateur, André devient la seule interface entre acteurs cloisonnés

**Mais il manque encore une pièce au puzzle.**

Même avec de la bonne volonté, même avec du temps, même avec des moyens supplémentaires, **le système actuel intervient toujours trop tard** : Pourquoi ?

Parce qu'il fonctionne sur une logique obsolète : **la maintenance planifiée.**

Je sais. Le mot peut choquer. **André n'est pas une machine.**

Mais la **LOGIQUE ORGANISATIONNELLE** du système, elle, ressemble trait pour trait à celle d'une maintenance industrielle des années 1970 :

- Intervention selon calendrier fixe (« *revenez dans 3 mois* »)
- Indépendamment de l'état réel entre deux contrôles
- Réaction tardive, quand le problème est déjà visible

Cette logique, **l'industrie l'a abandonnée il y a 20 ans.** Parce qu'elle était structurellement incapable de gérer la complexité dynamique des systèmes critiques.

**La médecine chronique, elle, l'a gardée.**

Non par choix délibéré. Mais parce qu'elle n'avait pas les outils pour faire autrement.

**Ces outils existent désormais.**

### **1. Le paradigme implicite : "Revenez me voir dans 3 mois"**

La médecine de ville repose encore largement sur un modèle calendaire :

- « Revenez me voir dans 3 mois »
- Voire pire : « Revenez me voir après avoir vu le spécialiste Y »
- « On refait une prise de sang dans 6 mois »
- « Consultation annuelle de contrôle »

Ce modèle est indépendant de l'état réel du patient entre deux consultations.

Qu'André se déstabilise au bout de 2 semaines ou reste stable 5 mois ne change rien au calendrier.

**Le fait clé, rarement formulé explicitement : Plus de 99 % du temps d'un patient chronique ( et donc de toute éventuelle dégradation clinique ) se déroule hors de toute présence médicale.**

8 consultations par an × 30 minutes = 4 heures de contact médical sur 8 760 heures annuelles.

C'est dans ces 8 756 heures invisibles que se préparent :

- la dérive glycémique progressive, - la rétention hydrique silencieuse, - l'aggravation tensionnelle, - la perte d'observance, - l'émergence d'une comorbidité.

**Le système ne voit rien.** Jusqu'au jour où tout devient visible — trop brutalement.

Les pompiers du SDIS amènent **André décompensé aux urgences.**

## **2. Le paradoxe : nous excellons dans l'aigu, échouons dans le chronique**

Notre système est excellent pour :

- l'infarctus, - l'AVC, - l'œdème pulmonaire, - la décompensation aiguë.

Il est structurellement mauvais pour :

- les trajectoires lentes, - les signaux faibles, - les dérives progressives, - les phénomènes cumulatifs.

### **Pourquoi ?**

Parce que le signal clinique devient visible uniquement quand le dommage est déjà constitué.

Le système actuel pratique **une médecine de l'événement, pas de la trajectoire.**

**Une médecine de l'aigu, pas une médecine préventive.**

Or, dans les maladies chroniques :

- la décompensation n'est presque jamais brutale, - elle est précédée de semaines, parfois de mois, de signaux faibles.

Mais ces signaux ne sont :

- ni mesurés en continu, - ni agrégés, - ni interprétés dynamiquement.

**Ils sont donc perdus :** Le paradoxe dans le paradoxe : des données massives, mais aveugles, inexploitées (car souvent très difficilement exploitables) !

Même dans les hôpitaux, où des volumes considérables de données sont générés (≈50 petabytes/an selon le World Economic Forum) : **97 % restent inutilisées.**

97 % de données hospitalières ( structurées, horodatées, validées ) ne servent jamais à prédire, anticiper, ou orchestrer. **Et nous ne parlons ici que des données hospitalières.**

La médecine de ville, elle, ne capte quasiment rien : - pas de monitoring continu, - pas de dispositifs connectés médicaux généralisés, -pas de plateforme d'agrégation.

**Le système génère des montagnes de données à l'hôpital et reste aveugle là où se joue 99 % de la vie du patient.**

### **3. D'autres industries ont résolu ce problème il y a 20 ans**

Ce problème n'est pas spécifique à la santé.

Il est identique à celui rencontré par plusieurs industries critiques :

- Aéronautique (moteurs d'avion, turbines)
- Énergie (centrales, réseaux électriques)
- Industrie lourde (raffineries, sidérurgie)
- Transport ferroviaire, télécoms, datacenters

**Avant les années 2000**, ces industries fonctionnaient comme la médecine aujourd'hui :

- maintenance calendaire, souvent régulée (que la pièce soit en panne ou non, il faut la changer),
- inspections périodiques,
- interventions après incident,

**Résultat** : pannes imprévues, coûts élevés, risques majeurs.

### **La rupture : la maintenance prédictive**

La révolution est venue avec trois briques combinées :

1. **Capteurs continus** (IoT) Vibrations, température, pression, usure...
2. **Modèles numériques dynamiques** Jumeaux numériques des équipements, mis à jour en temps réel
3. **Algorithmes prédictifs** Détection de patterns anormaux avant la panne visible

**Le paradigme a changé : De la maintenance planifié à la maintenance prédictive**

AVANT (MAINTENANCE PLANIFIÉE)		APRÈS (MAINTENANCE PRÉDICTIVE)	
✘ Révision tous les X mois	→	Intervention quand le risque augmente	✓
✘ Panne subie	→	Défaillance anticipée	✓
✘ Coût maximal	→	Coût optimisé	✓
✘ Intervention tardive	→	Action précoce ciblée	✓

**Résultats mesurés** (McKinsey, Deloitte, PwC 2019-2022) :

- -30 à -50 % de pannes imprévues
- -10 à -40 % de coûts de maintenance
- +10 à +20 % de disponibilité des systèmes

#### 4. La question dérangeante

**Pourquoi un moteur d'avion bénéficie-t-il d'une surveillance continue prédictive, mais pas un patient polyopathologique à haut risque vital ?**

André est pourtant :

- un système complexe,
- multi-paramétrique,
- non linéaire,
- soumis à des dérives progressives,
- avec des conséquences graves en cas de défaillance.

**Exactement comme un système industriel critique.**

La seule différence ? Peut-être n'avons nous pas non plus la motivation politique (ni le modèle économique) pour traiter les personnes vieillissantes polyopathologique. Nous n'avons pas les briques technologiques pour observer les trajectoires en continu. **Elles sont désormais disponibles.**

#### 5. Le jumeau numérique d'André — De la théorie à la pratique

**Qu'est-ce qu'un jumeau numérique ?**

Imaginez une représentation "vivante", dynamique, d'André dans le système de santé , non pas un simple dossier figé, mais un modèle qui évolue en temps réel avec son état physiologique.

Alimenté en continu par des capteurs médicaux (glycémie, tension, poids, fréquence cardiaque), ce modèle analyse les patterns, détecte les dérives progressives, et alerte au bon moment. C'est la différence entre une photo (dossier médical) et une vidéo en direct (jumeau numérique)

Un jumeau numérique **n'est pas** :

- [KO] Un dossier médical électronique (statique),
- [KO] Une application de suivi patient (déclaratif),
- [KO] Un chatbot IA (conversationnel).

Un jumeau numérique **EST** :

- [OK] Un modèle computationnel dynamique du patient,
- [OK] Alimenté en temps réel par capteurs médicaux (ce n'est pas un "digital shadow"),
- [OK] Capable d'analyser patterns, prédire événements, alerter au bon moment.

**C'est la représentation numérique vivante/dynamique "temps réel" d'André, qui évolue avec son état physiologique en temps réel.**

## **6. Architecture fonctionnelle en "couches"**

Le système repose sur une **architecture en plusieurs couches**, en arrière-plan, invisible pour le patient comme pour le médecin.

Plutôt qu'une intelligence artificielle unique et opaque, il s'appuie sur **plusieurs petites IA spécialisées** ("Agentic AI"), chacune chargée d'une tâche précise : surveiller le poids, détecter une dérive glycémique, repérer un risque de décompensation. Cette approche est plus fiable, plus contrôlable et plus facile à faire évoluer dans le temps.

Ces IA apprennent à partir de **données médicales déjà existantes**, issues du suivi réel de patients chroniques, dans un cadre strictement encadré sur le plan réglementaire. Et ce pour pouvoir prédire l'évolution clinique des patients en déshérence médicale sur la base des données fournies/remontées par leur kit IoMT.

Une fois le patient équipé lors de la visite initiale, elles analysent les données remontant des **objets connectés du quotidien** (balance, tensiomètre, capteur de glycémie...) afin de repérer **des trajectoires de dégradation progressive**, bien avant que les symptômes ne deviennent visibles, "bruyants".

Les données sont stockées de manière sécurisée dans des infrastructures de santé, et seules des **informations utiles, synthétisées et actionnables** sont transmises aux professionnels et au patient.

Contrairement à l'industrie, il n'est pas nécessaire de surveiller un patient en continu, à la milliseconde. Ce qui compte, c'est de **réagir dès qu'un signal pertinent apparaît**. Une architecture déclenchée par les événements ("Event Driven Architecture") permet ainsi d'intervenir **au bon moment**, sans complexité inutile.

Enfin, pièce maîtresse du dispositif, **l'application compagne sur smartphone** joue le rôle d'interface simple et rassurante entre le patient et le système : C'est une **vigie silencieuse et rassurante**. Elle agit comme une **passerelle discrète** : elle collecte automatiquement les données des objets connectés, transmet les informations nécessaires, et n'interpelle le patient que lorsque c'est utile.





Concrètement, l'application

- facilite la **transmission des données** sans manipulation complexe,
- envoie des **alertes simples et compréhensibles** lorsque l'attention est requise,
- propose des **rappels de traitement et de rendez-vous** pour soutenir l'observance,
- offre un **accompagnement personnalisé d'hygiène de vie** adapté à la situation du patient,
- sert de **canal d'éducation thérapeutique**, au bon moment, sans surcharge,
- et permet, si nécessaire, un **lien fluide avec les professionnels de santé**.

L'objectif n'est pas de transformer le patient en expert de ses données, mais au contraire de **le libérer de la surveillance permanente**, en lui apportant sécurité, continuité et simplicité dans son quotidien.

### 1 Couche 1 : Acquisition IoMT

Internet of Medical Things — Capteurs médicaux connectés

 <b>Balance connectée</b> Fréquence : quotidienne Précision : ±0.1kg Détection rétention hydrique progressive	 <b>Tensiomètre</b> Fréquence : 2×/jour Protocole : BHS Grade A Mesure automatique matin/soir	 <b>Montre connectée</b> FC continue (1 Hz) HRV, sommeil, activité Monitoring 24/7	 <b>Questionnaires</b> Symptômes NYHA Orthopnée, œdèmes Auto-évaluation quotidienne
--	--	---	--

La couche d'acquisition repose sur des **capteurs médicaux connectés simples, éprouvés et cliniquement pertinents**, adaptés au suivi des patients chroniques à risque.

Les mesures collectées privilégient des **signaux faibles mais prédictifs** :

- le poids pour détecter une rétention hydrique progressive,
- la tension artérielle pour suivre les dérives tensionnelles,
- la fréquence cardiaque, l'activité et le sommeil pour caractériser l'état fonctionnel,
- ainsi que des questionnaires courts permettant de capter des symptômes subjectifs non mesurables par capteur.






Le dispositif est **progressif et personnalisé** : tous les patients ne sont pas équipés de la même manière, et la fréquence des mesures est ajustée à leur profil clinique et à leur situation.

Lorsque cela est pertinent sur le plan médical, une **surveillance continue de la glycémie** peut être ajoutée via un capteur dédié, notamment chez certains patients diabétiques, afin d'enrichir la détection précoce des déséquilibres métaboliques.

L'objectif n'est pas de multiplier les contraintes pour le patient, mais au contraire de **collecter automatiquement l'essentiel**, sans saisie manuelle complexe ni interprétation demandée, afin d'alimenter les couches d'analyse et de décision du jumeau numérique.

**2** **Couche 2 : Application Compagnonne**  
Le maillon humain (smartphone patient)

---

 <b>Gateway IoT</b> Collecte données Bluetooth Transmission sécurisée HDS Cache local si offline <i>Agrégation + Chiffrement E2E</i>	 <b>Dashboard patient</b> Visualisation tendances Objectifs personnalisés Historique 7j/30j/3mois <i>Interface UX seniors</i>	 <b>Chatbot éducation</b> FAQ 70% questions Escalade intelligente Éducation thérapeutique <i>NLP + Règles métier</i>	 <b>Infirmier virtuel</b> Rappels médicaments Rappels constantes Rappels rendez-vous <i>Notifications push intelligentes</i>
 <b>Communication</b> Messagerie sécurisée Partage résultats temps réel Feedback immédiat <i>E2E encryption</i>			

L'application compagnonne constitue le **maillon humain du dispositif**. Elle joue un rôle technique essentiel (collecte, agrégation et transmission sécurisée des données IoT) mais sa fonction première est ailleurs : Elle humanise la technologie pour la faire adopter par l'écosystème (notamment le patient).

Elle agit comme une **vigie silencieuse et rassurante**, présente 24h/24 aux côtés du patient, sans lui imposer une surveillance active ou une charge cognitive supplémentaire.

Pour le patient, l'application :

- automatise la collecte des données du quotidien,
- rend visibles uniquement les informations utiles,
- n'alerte que lorsque c'est nécessaire,
- et apporte des explications simples et contextualisées.

Pour les professionnels, elle permet :

- de déléguer une partie de la surveillance continue,
- de soutenir l'observance thérapeutique (traitements, rendez-vous),
- et de renforcer l'accompagnement à domicile, en particulier pour les Prestataires de Soins à Domicile (PSAD).

L'application ne remplace ni l'infirmier, ni le médecin. Elle **augmente les capacités humaines**, en assurant la continuité entre deux contacts de soin, là où le système actuel est structurellement aveugle.

Son objectif n'est pas de faire agir le patient en permanence, mais au contraire de **le libérer de la surveillance**, en lui apportant sécurité, simplicité et confiance dans la durée.

### 3 Couche 3 : Modèles ML & Jumeau Numérique

Agentic AI — 4 agents spécialisés orchestrés

 <h4>Ensemble Learning</h4> <p>Trajectoires prédictives Détection patterns pré-décompensation 87 features dérivées</p> <p><i>XGBoost + LightGBM + DNN (0.4, 0.35, 0.25)</i></p>	 <h4>Modèle circadien</h4> <p>Patterns temporels Rythmes FC/sommeil Écarts à baseline patient</p> <p><i>LSTM pour séries temporelles</i></p>	 <h4>Détection anomalies</h4> <p>Surveillance multi-paramètres Signaux faibles Isolation outliers</p> <p><i>Isolation Forest + Autoencoder VAE</i></p>	 <h4>Jumeau numérique</h4> <p>Simulation physiologique Prédiction trajectoire 30j Calibration patient-spécifique</p> <p><i>Simulation ODE + calibration bayésienne</i></p>
--	---	---	---

On observe ici la **coexistence de plusieurs architectures d'intelligence artificielle**, chacune répondant à un rôle précis dans le système. Cette diversité n'est pas un hasard : les données manipulées sont avant tout des **séries temporelles numériques** (poids, glycémie, tension, fréquence cardiaque), pour lesquelles des modèles spécialisés sont plus performants, plus explicables et plus robustes que des approches généralistes.

Un choix architectural est donc assumé : **le Large Language Model (LLM) n'intervient pas dans le cœur prédictif et décisionnel**. Ce n'est pas une limite, mais une décision de conception. Les LLM ne sont ni optimisés pour la modélisation de trajectoires physiologiques, ni pour la détection de signaux faibles dans des séries temporelles continues, et leur usage dans ces fonctions critiques poserait des problèmes de traçabilité et de gouvernance.

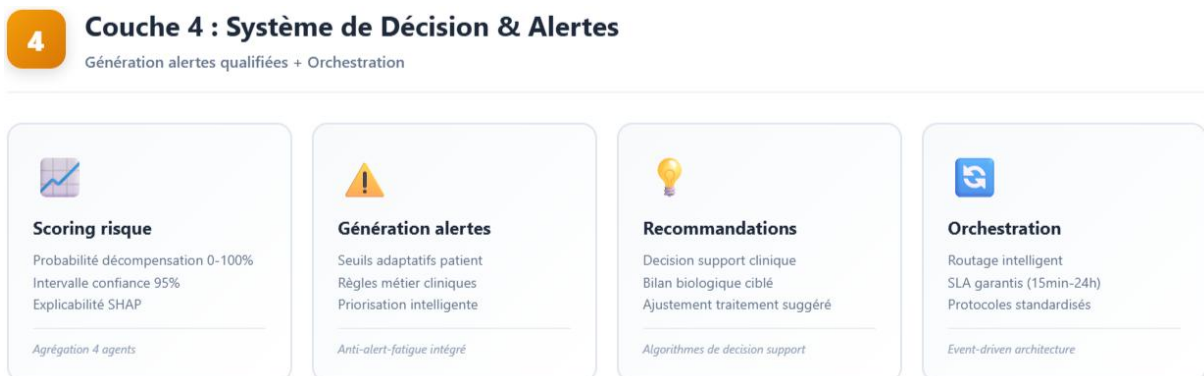
En revanche, le LLM trouve toute sa valeur **au niveau de l'application compagne**, comme interface d'interaction en langage naturel. Il permet :

- d'expliquer simplement les alertes et recommandations,
- de guider le patient dans l'usage de la solution,
- de faciliter l'adoption, y compris pour des personnes peu à l'aise avec le numérique.

Cette séparation des rôles est centrale :

=> **des modèles spécialisés pour comprendre l'état clinique,**





=> **un LLM pour rendre le système compréhensible et utilisable par l'humain.**



Il est essentiel de maîtriser le flux informationnel et décisionnel, c'est-à-dire la manière dont les événements, les scores de risque et les recommandations circulent dans le système. Cette maîtrise repose sur une architecture événementielle (broker, Event-Driven Architecture) permettant un routage contrôlé, traçable et priorisé des informations, sans couplage direct entre les composants.

La fiabilité des prédictions et des recommandations n'est pas supposée : elle est mesurée, suivie dans le temps et confrontée aux décisions réellement prises et à leurs résultats cliniques.

Les données collectées ne servent donc pas uniquement à produire de l'inférence en temps réel, mais également à alimenter une boucle d'amélioration continue des jumeaux numériques, dans un cadre strictement gouverné, auditable et conforme aux exigences réglementaires.

 <b>Dashboard 360°</b> Vue patient complète Données pré-synthétisées Timeline événements  <i>Consultation 20min vs 45min</i>	 <b>Alertes priorisées</b> CRITICAL/HIGH/MEDIUM/LOW Escalade automatique SLA monitoring  <i>Push + SMS + Appel si nécessaire</i>	 <b>Protocoles guidés</b> Checklists interactives Prescriptions pré-rédigées Traçabilité compliance  <i>Workflows standardisés</i>	 <b>Intégration SI</b> API REST ouverte WebSocket temps réel Export DMP automatique  <i>Interopérabilité FHIR</i>
---	---	---	--

La couche 5 constitue l'interface professionnelle du système. Elle ne se limite pas au médecin traitant : elle s'adapte au **rôle de chaque acteur**, du soin individuel au pilotage territorial.

### Pour les professionnels de santé

Le dashboard clinique fournit une **vue patient à 360°**, avec :

- des données pré-synthétisées,
- une chronologie claire des événements,
- des alertes priorisées selon leur criticité,
- et des protocoles guidés facilitant la décision et la traçabilité.

L'objectif est explicite : **réduire le temps de consultation non clinique**, améliorer la pertinence des interventions et sécuriser les décisions.

### Pour les acteurs de coordination et les ARS

À un autre niveau de granularité, le système met à disposition des **tableaux de bord populationnels et territoriaux**, permettant :

- de suivre l'évolution des patients en déshérence à l'échelle d'un territoire,
- d'identifier des zones de tension entre offre et demande de soins,
- d'analyser les trajectoires évitées (hospitalisations, passages aux urgences),
- et de mesurer l'impact médico-économique des actions mises en œuvre.

Ces vues agrégées reposent sur les mêmes jumeaux numériques, mais sont **désidentifiées, consolidées et orientées pilotage**.

### Une interface multi-niveaux, un même socle

La force du dispositif réside dans cette continuité :

- **un même socle de données et de modèles,**

- des **interfaces adaptées aux usages**,
- et une capacité à relier décision clinique, coordination et gouvernance.

Ainsi, le système ne se contente pas d'aider à mieux soigner un patient : il permet aussi de **piloter une politique de santé territoriale fondée sur des trajectoires réelles et mesurables**.