Tirer parti de l'intelligence artificielle pour gérer une transition durable dans la viticulture « STIV »

MODULE 2 : Transition numérique dans la viticulture

La viticulture de précision représente une révolution dans la gestion des vignobles, combinant technologie de pointe, analyse de données et connaissances agronomiques pour s'adapter aux défis climatiques, environnementaux et qualitatifs du secteur viticole. Dans ce module, nous explorerons ses principes fondamentaux, ses outils clés (et non exhaustifs) et ses applications pratiques pour une production plus efficace et durable. Ces outils sont plus ou moins développés selon les pays partenaires du projet.

Le module est complété par des exercices de revisions en annexe.

Mentions légales

Cofinancé par l'Union européenne. Toutefois, les points de vue et opinions exprimés sont ceux des auteurs et ne reflètent pas nécessairement ceux de l'Union européenne ou de l'Agence exécutive européenne pour l'éducation et la culture (EACEA). Ni l'Union européenne ni l'EACEA ne peuvent en être tenus responsables.

Date : 20/02/2026

Le consortium STIV

Co-funded by the European Union

Erasmus+
Enrichit les vies, ouvre les esprits.

Contenu

1. Introduction à la viticulture de précision 2
2. Principes fondamentaux de la visualisation numérique du vignoble 7
3. Technologies de surveillance intelligentes dans le vignoble 10
4. Modélisation prédictive et gestion avancée des données 16
5. Systèmes d'aide à la décision (DSS) dans la viticulture de précision 31
6. Défis et opportunités de la numérisation dans la viticulture 43
7. Évaluation stratégique de l'adoption des technologies 50
ANNEXE I – Questions de révision 57
ANNEXE II – Activité didactique : « Choisir les technologies adaptées à deux caves viticoles confrontées à des problèmes similaires » 59
Références 63

1. Introduction à la viticulture de précision

La viticulture de précision est devenue l'une des stratégies les plus efficaces pour relever les défis actuels du secteur viticole, notamment : les changements liés au réchauffement climatique, la pression sur les ressources naturelles, la nécessité d'améliorer la qualité des produits viticoles et les exigences des consommateurs en matière de traçabilité. La viticulture de précision repose sur l'observation systématique, la mesure continue et l'intervention à l'échelle locale dans les champs, ce qui permet une gestion personnalisée de la production en fonction des particularités physiques, biologiques et climatiques de chaque sous-zone.

L'idée principale derrière la viticulture de précision est de pouvoir identifier et gérer la **variabilité spatiale et intra-parcellaire du vignoble**. Depuis les années 1980, des études pionnières menées par Smart (1985) et Bramley (2003) ont montré que, au sein d'une même parcelle de vigne, il existe des différences marquées et palpables en termes de vigueur, de teneur en humidité et de texture du sol, d'exposition au soleil et de pente, ce qui se traduit par des inégalités en termes de rendement et de qualité des raisins. Ignorer cette hétérogénéité conduit à une gestion agronomique inefficace et non durable sur le plan environnemental.



Figure1 . Hétérogénéité entre les parcelles. Source : Marcos Machado, 2022

La gestion de précision de la viticulture repose sur un ensemble de technologies qui agissent de manière interconnectée :

- **Les capteurs de terrain**, qui mesurent l'humidité du sol, la température de l'air, la pression de vapeur ou le rayonnement solaire, peuvent être installés à différentes profondeurs et à différents endroits dans la canopée de la plante afin d'obtenir des données précises et représentatives.



Figure2. Capteur de terrain. *Source : AGROTECH*

- **La télédétection par satellite et drone** mesure des longueurs d'ondes à partir desquels on peut calculer des indices tels que le NDVI (indice de végétation par différence normalisée), le SAVI ou le NDRE, tous trois utilisés pour estimer la vigueur végétative, l'état nutritionnel ou le potentiel photosynthétique de la plante. Il en existe bien sûr de nombreux autres.

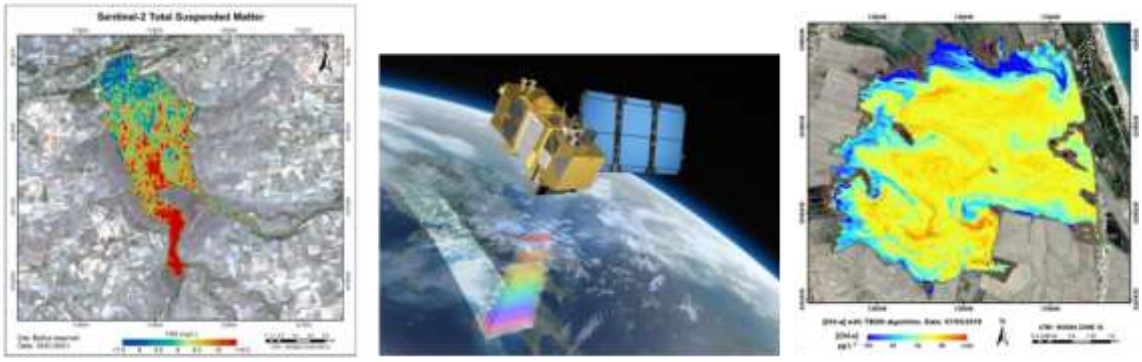

Figure3 . Télédétection par satellite pour l'étude de la qualité de l'eau. *Source : gvSIG*

- **Les systèmes d'information géographique (SIG),** qui intègrent des données spatiales et temporelles pour générer des cartes de zonage et de prescription agronomique avec des résolutions pouvant aller de 30 mètres (Sentinel-2) à 2-5 cm (UAV). **Le zonage** classe les différents sols du vignoble afin d'appliquer une gestion adaptée à chaque type de sol. **La prescription**

consiste à adapter la gestion de la fertilisation et de la protection aux caractéristiques du vignoble sur le terrain.

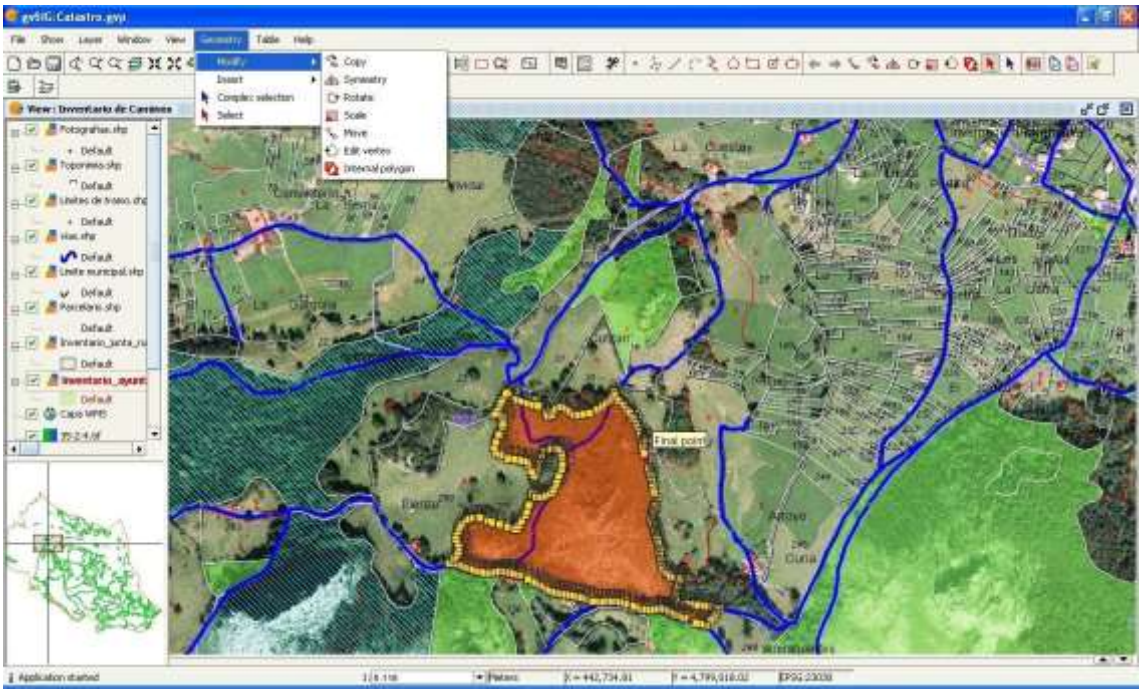

Figure4 . Zonage d'une parcelle à l'aide du SIG. *Source : Méthode environnementale*

- **Les modèles prédictifs et les algorithmes d'intelligence artificielle**, tels que les réseaux neuronaux, les machines à vecteurs de support (SVM) et la régression aléatoire forestière, transforment les données en informations et recommandations exploitables. Leurs applications vont de la prévision du rendement et de la qualité du raisin à la détection des maladies et des besoins en irrigation.

  En 2012, Bruno Tisseyre Professeur en agriculture de précision à l'Institut Agro (Montpellier SupAgro) dans le cadre de son HDR publier "PEUT-ON APPLIQUER LE CONCEPT D'AGRICULTURE DE PRECISION A LA VITICULTURE ?"

  https://www.agrotic.org/test/blog/wp-content/uploads/2012/01/HDR_Bruno_Tisseyre.pdf

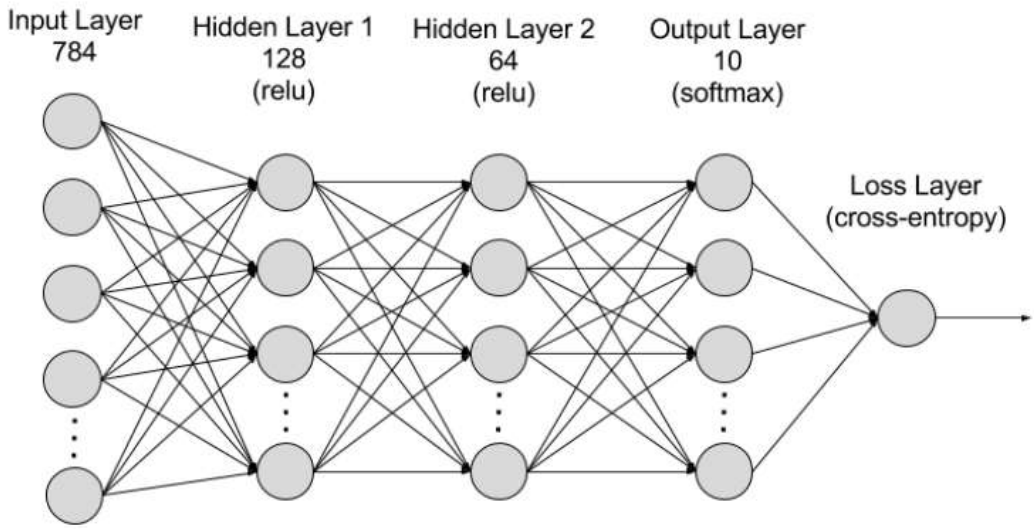

Figure5 . Fonctionnement d'un réseau neuronal artificiel. *Source : AWS*

- **Les plateformes numériques d'aide à la décision** offrent des tableaux interactifs, des alertes, des enregistrements géoréférencés et une connectivité en temps réel avec les machines et les appareils IoT, ce qui permet de gérer le vignoble à distance.

Grâce à ces outils, le viticulteur peut identifier des zones de gestion spécifiques (SMA) au sein du vignoble et appliquer des traitements différenciés, tels que l'irrigation, la fertilisation, le contrôle phytosanitaire ou la récolte sélective, optimisant ainsi l'utilisation des ressources et améliorant la qualité œnologique. Par exemple, dans des régions telles que la Napa Valley (États-Unis) ou la vallée de Maipo (Chili), des capteurs d'humidité du sol et des cartes NDVI ont été utilisés pour établir des lignes d'irrigation sectorisées, ce qui a permis de réaliser jusqu'à 40 % d'économies d'eau sans réduire la productivité.

Depuis son développement initial avec le GPS différentiel dans les années 90, la viticulture de précision a évolué vers des systèmes plus sophistiqués, accessibles et adaptables. Les progrès de la technologie numérique ont permis de démocratiser son utilisation : il existe aujourd'hui des capteurs à faible coût, des drones accessibles, des logiciels open source et des plateformes cloud qui permettent leur adoption même dans les exploitations agricoles de taille moyenne et petite. Des projets tels que VineScout (Espagne), GrapeLook (Afrique du Sud) ou Vintel (France) ont démontré l'efficacité de ces outils dans diverses conditions pédologiques et climatiques (Baluja et al., 2012 ; Matese & Di Gennaro, 2015).

En outre, la viticulture de précision favorise également la durabilité environnementale en réduisant l'utilisation de produits phytosanitaires, en minimisant l'empreinte hydrique et en favorisant la biodiversité. Son intégration avec les pratiques agricoles régénératrices, la viticulture biologique et les certifications telles que HVE (Haute Valeur Environnementale) renforce son rôle d'outil clé dans la transition écologique du secteur.

Pour toutes ces raisons, la viticulture de précision se présente comme un outil fondamental pour promouvoir une viticulture plus intelligente, plus résiliente et plus durable. Elle ne remplace pas les connaissances du viticulteur, mais les enrichit en fournissant une base objective et actualisée pour la prise de décision. Dans le cadre de la transition numérique du secteur agricole européen, cette discipline s'impose comme l'un des éléments clés pour atteindre les objectifs du Pacte vert, de la stratégie « De la ferme à la table » et de la numérisation de l'environnement rural.

2. Principes fondamentaux de la visualisation numérique du vignoble

L'un des grands défis de la viticulture de précision ne se limite pas à la collecte de données, mais englobe également leur analyse et leur interprétation. À mesure que les caves intègrent des capteurs, des stations météorologiques, des images satellites et des données historiques, une quantité toujours plus importante d'informations est produite, qui doit être traitée et transformée en connaissances utiles. En ce sens, les outils de visualisation des données et les modèles prédictifs sont essentiels pour prendre des décisions éclairées, en particulier lorsqu'ils sont intégrés dans des flux de travail numériques allant de la collecte de données à des actions agronomiques spécifiques.

Visualisation des données en viticulture

La visualisation des données est un moyen de présenter de manière graphique et claire les informations quantitatives collectées dans le vignoble. Grâce à des cartes thématiques, des graphiques interactifs, des modèles 3D et des tableaux de bord, il devient plus facile de comprendre des phénomènes complexes tels que la variabilité spatiale, l'évolution des saisons, les conditions microclimatiques, la densité des pousses ou l'indice de surface foliaire. En d'autres termes, elle transforme de grandes quantités de données techniques en connaissances visuelles qui peuvent être comprises par les techniciens, les agriculteurs et les vignerons, sans qu'il soit nécessaire de suivre une formation avancée en analyse de données.

Les systèmes d'information géographique (SIG) sont des outils essentiels pour visualiser les données spatiales. Grâce à des cartes de vigueur (NDVI), d'humidité du sol, de rendement, d'incidence des maladies ou de stress thermique, les vignerons peuvent détecter des tendances et des zones critiques au sein de leurs parcelles.

Dans la pratique, des applications spécifiques ont été développées, telles que VineView, qui facilite la surveillance visuelle continue du vignoble grâce à des outils de zonage automatiques, ou des solutions telles que Cropio et AgriWebb, qui intègrent les données provenant de capteurs, de machines et de la météo pour

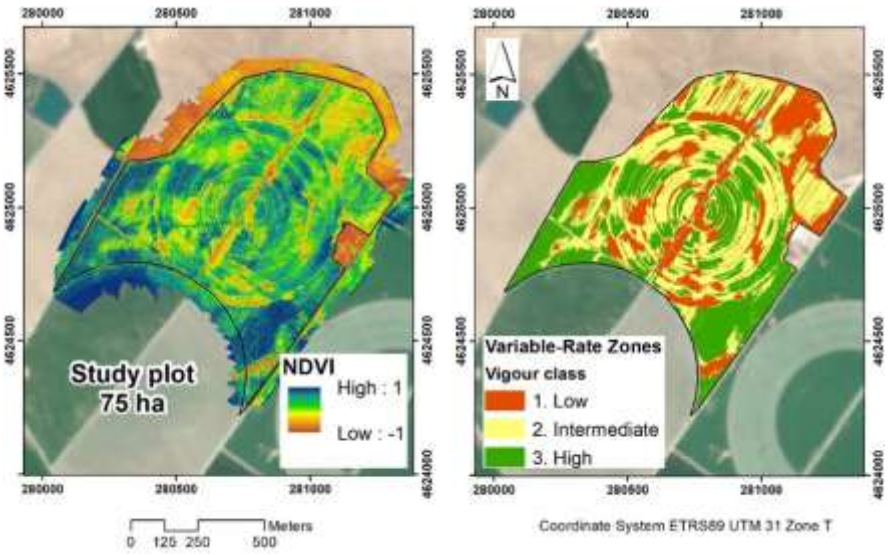

Figure6 . À gauche : NDVI dérivé de l'imagerie multispectrale acquise en mars 2019 pour évaluer l'état de développement de l'orge afin de déterminer la fertilisation du paillis avec une dose variable. À droite : zones de fertilisation variable. Source :

créer des modèles numériques en temps réel. Au niveau européen, des initiatives telles que FutureFarm et SmartAgriHubs ont largement contribué au développement de plateformes interopérables pour la visualisation agronomique.

De plus, des outils de veille économique tels que Power BI, Tableau ou Qlik Sense permettent d'intégrer des données provenant de diverses sources, telles que des capteurs, les conditions météorologiques et l'analyse des sols, et de les présenter dans des tableaux de bord personnalisables. Ces tableaux de bord peuvent être configurés pour envoyer des alertes automatiques, générer des rapports périodiques ou simuler différents scénarios de gestion agronomique. Il existe aujourd'hui plusieurs plateformes commerciales dédiées au vin, telles que VineSignal, Farm360 ou Datagrapes, qui proposent des solutions spécifiques pour le secteur viticole, notamment des fonctions de géolocalisation, de gestion des lots, de comparaison temporelle et de visualisation historique.

La visualisation améliore non seulement la prise de décision, mais facilite également la communication entre les techniciens, les vignerons, les opérateurs sur le terrain et les gestionnaires, permettant une gestion plus coordonnée et mieux informée. En effet, dans de nombreux vignobles modernes, des panneaux d'affichage sont intégrés aux centres de contrôle des opérations et sont mis à jour en temps réel grâce à la synchronisation avec les stations météorologiques, les capteurs de terrain et les machines connectées.

Modélisation prédictive et analyse avancée

La modélisation prédictive repose sur l'utilisation d'algorithmes statistiques et de techniques d'intelligence artificielle pour prédire le comportement futur du vignoble, en tenant compte de diverses variables observées. Cette méthodologie permet de passer d'une gestion réactive à une gestion plus proactive, en anticipant les risques et en optimisant l'utilisation des ressources. Dans un environnement en constante évolution, affecté par le changement climatique, la capacité à prévoir différents scénarios et à agir à l'avance devient un avantage stratégique inestimable.

Il existe plusieurs types de modèles utilisés en viticulture, chacun ayant un objectif et une finalité spécifiques :

1. **Modèles phénologiques** : ils prédisent les phases critiques du développement de la vigne, telles que le bourgeonnement, la floraison, la véraison et la maturation. Ces modèles sont basés sur des variables climatiques, telles que la température cumulée (degré-jour), la photopériodicité et l'humidité relative. Des outils tels que Phenoclim, VitiMeteo et STICS sont capables de simuler le développement phénologique avec une grande précision, ce qui permet de planifier plus efficacement les tâches dans les champs et les opérations dans les caves.
2. **Modèles phytosanitaires** : ils permettent d'anticiper l'apparition de maladies fongiques, telles que le mildiou (Plasmopara viticola), l'oïdium (Uncinula necator), le black rot et le botrytis (Botrytis cinerea). Ces modèles

sont basés sur des paramètres tels que la température, l'humidité des feuilles et la quantité de précipitations. Parmi les modèles les plus couramment utilisés, on trouve celui de Goidanich pour le mildiou et celui de Broome pour le botrytis. Il existe également des modèles plus complexes qui incluent des variables microclimatiques de la canopée, les interactions entre les plantes et les agents pathogènes, ainsi que des paramètres de sensibilité en fonction du cépage.

3. **Modèles hydrologiques** : ces modèles permettent de calculer le bilan hydrique du sol et le stress hydrique potentiel que la plante peut subir, à l'aide de capteurs d'humidité, de données météorologiques et des caractéristiques du sol. Grâce à ces modèles, l'irrigation peut être programmée avec précision, évitant ainsi à la fois les déficits et les excès d'eau. La combinaison des données provenant des capteurs et des modèles tels qu'AquaCrop ou Hydrus a été validée dans les régions viticoles méditerranéennes, telles que le sud de la France, la Castille-La Manche ou la Sardaigne, et a donné des résultats très positifs en réduisant la consommation d'eau sans affecter le rendement.
4. **Modèles de rendement et de qualité** : ils sont dédiés à l'estimation de la production attendue (kg/ha) et des paramètres œnologiques tels que la teneur en sucre, l'acidité ou les anthocyanes. Des techniques d'apprentissage automatique sont utilisées, telles que la régression linéaire, les arbres de décision, les réseaux neuronaux artificiels (RNA) et les méthodes d'assemblage telles que la forêt aléatoire, qui sont entraînées avec des données historiques et variables en temps réel. Dans des études récentes menées dans des vignobles de la Rioja et du Priorat, les modèles de forêt aléatoire ont montré une erreur de prédiction inférieure à 10 % en termes de rendement et une corrélation supérieure à 0,85 avec la qualité attendue des raisins.
5. **Jumeaux numériques** : ils représentent numériquement un vignoble réel, en intégrant toutes les couches d'informations dans une simulation virtuelle qui permet d'évaluer des scénarios futurs et de planifier des interventions. Ces systèmes combinent la modélisation 3D, la dynamique des systèmes et des capteurs connectés pour représenter l'état du vignoble en temps réel. Des projets européens tels que SmartVitiNet, VINIoT ou DIGIWINE sont à la pointe de cette transition vers une gestion basée sur les données jumelles, avec des applications dans la planification, la traçabilité et la simulation de stratégies agronomiques.
6. **Modèles socio-économiques intégrés** : plus récemment, certains projets développent des modèles qui intègrent des facteurs agronomiques à des variables économiques, sociales et commerciales, permettant de prédire l'impact économique de différentes pratiques de gestion ou de différents scénarios climatiques. Ces outils sont essentiels pour les politiques publiques, les coopératives et les grands domaines viticoles qui gèrent des chaînes d'approvisionnement complexes.

Défis et perspectives d'avenir

Malgré les progrès réalisés, la mise en œuvre efficace de ces outils nécessite de surmonter plusieurs défis :

- La qualité, l'homogénéité et la normalisation des données sont essentielles pour obtenir des modèles fiables.
- Une formation technique et agronomique avancée est nécessaire pour interpréter correctement les résultats et éviter les erreurs dans la prise de décision.
- L'interopérabilité entre les plateformes numériques et les appareils de différents fabricants reste une limitation technique et commerciale.
- L'investissement initial peut être élevé, en particulier dans les petites exploitations agricoles, même si les avantages se manifestent à moyen et long terme.

À l'avenir, on prévoit une plus grande intégration entre les plateformes, l'émergence d'assistants numériques agricoles (AgBots) et l'utilisation massive de l'intelligence artificielle générative pour simuler les comportements agronomiques. De même, l'utilisation de capteurs non invasifs, d'algorithmes auto-ajustables et de technologies blockchain sera accrue afin de garantir la traçabilité et l'intégrité des informations générées, ce qui contribuera à renforcer la transparence dans la chaîne de valeur du vin.

3. Technologies de surveillance intelligentes dans le vignoble

La surveillance intelligente en viticulture est le système sensoriel numérique du vignoble : un réseau intégré de dispositifs et de technologies qui capturent des informations précises et constantes sur l'état du sol, de la plante et de l'environnement. Cette surveillance évolutive et automatisée permet d'anticiper les événements indésirables, d'optimiser les ressources et de prendre des décisions éclairées. Les principaux composants de ce réseau sensoriel sont décrits en détail ci-dessous, avec des exemples d'application concrets et des références qui confirment son utilité.

3.1 Réseaux de capteurs sans fil au sol

Les réseaux de capteurs sans fil (WSN) appliqués au sol constituent une innovation fondamentale dans la viticulture de précision. Ces réseaux reposent sur l'installation de nœuds intelligents stratégiquement répartis dans le vignoble et connectés par des technologies à faible consommation d'énergie telles que LoRaWAN ou Zigbee. Les nœuds sont capables de mesurer des paramètres clés tels que l'humidité du sol, la température, la conductivité électrique ou le pH, et de

transmettre ces informations en temps réel à une station de base, au cloud et enfin à des plateformes numériques pour analyse et interprétation.

L'utilisation de ces réseaux a démontré des avantages tangibles. Par exemple, les systèmes mis en place dans des régions viticoles telles que La Rioja ont permis de réduire la consommation d'eau grâce à une irrigation mieux adaptée aux conditions météorologiques et pédologiques. De même, dans certaines régions de France, des réseaux similaires ont été utilisés pour détecter les conditions de gel et déclencher des alertes précoces, améliorant ainsi la capacité de réaction des viticulteurs sans qu'ils aient besoin d'être constamment présents sur le terrain.

Leurs principaux avantages sont leur faible coût d'exploitation, leur autonomie énergétique (jusqu'à plusieurs saisons sans entretien) et leur adaptabilité à différentes configurations de terrain. Cependant, leur installation nécessite une planification minutieuse, ainsi qu'un étalonnage et une vérification périodiques de la couverture sans fil, en particulier dans les vignobles à l'orographie complexe ou de grande étendue.

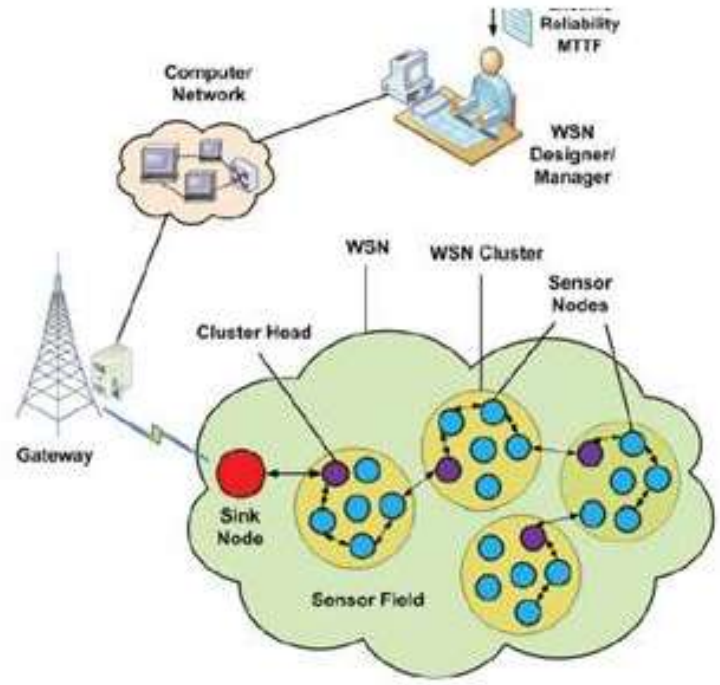

Figure7 . Architecture du réseau de capteurs sans fil. Source : Bolivar et al.

3.2 Télédétection à l'aide de drones et de satellites

La télédétection aérienne a transformé la gestion des vignobles en permettant une cartographie précise, fréquente et évolutive. Les satellites offrent une couverture régulière, quotidienne ou hebdomadaire, utile pour le suivi à grande échelle, tandis que les drones (UAS) permettent des vols à la demande, capturant des images à haute résolution spatiale (2 à 5 cm), ce qui est essentiel pour les décisions relatives aux parcelles.

À l'aide de caméras multispectrales, qui combinent les spectres visible, proche infrarouge et thermique, et de dispositifs hyperspectraux plus avancés, il est possible de calculer divers indices de végétation tels que le NDVI, le NDRE, le SAVI ou le GI. Ces indicateurs permettent d'évaluer la vigueur des plantes, de détecter le stress hydrique, de déterminer l'état phénologique et de révéler des carences nutritionnelles invisibles à l'œil nu.

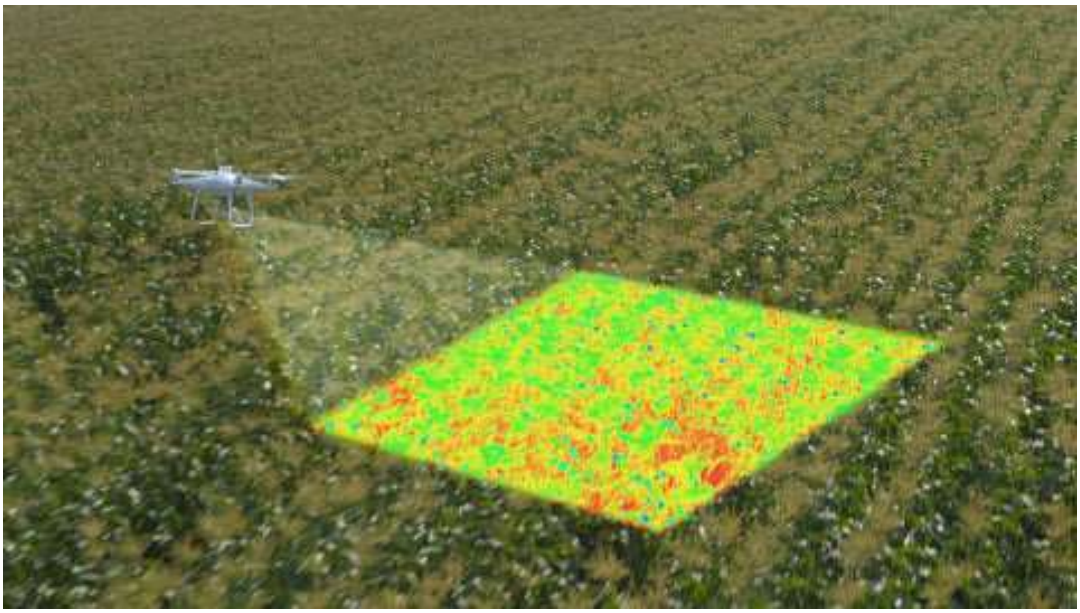

Figure8 . Télédétection par drone. Source : Cielito Drone Enterprise

Certains cas d'utilisation ont démontré leur impact agronomique. Dans les exploitations viticoles, la combinaison d'images thermiques et multispectrales a permis d'anticiper plusieurs jours à l'avance des maladies telles que le botrytis ou des épisodes de stress hydrique. Il a également été démontré que l'intégration hebdomadaire de cartes dans des plateformes SIG a facilité la prise de décisions plus opportunes en matière de récolte, contribuant ainsi à une plus grande homogénéité de la qualité finale du vin.

Plus récemment, l'utilisation de l'intelligence artificielle associée à ces données spectrales permet la détection précoce des parasites, du mildiou ou de l'oïdium avant qu'ils ne se manifestent visuellement. Des algorithmes basés sur des réseaux neuronaux traitent des bandes spécifiques du spectre pour générer des cartes de risque géoréférencées qui guident les interventions.

3.3 Réseaux météorologiques à haute résolution

Au-delà de la surveillance directe du sol et des plantes, les réseaux météorologiques jouent un rôle essentiel dans la prise de décision agronomique. Les stations autonomes, équipées de capteurs de température, d'humidité relative, de rayonnement solaire, de pression atmosphérique, de précipitations et de vitesse

du vent, permettent une compréhension dynamique de l'environnement microclimatique du vignoble.

Ces systèmes permettent d'appliquer des modèles prédictifs pour anticiper les risques phytosanitaires, tels que ceux liés au mildiou ou au botrytis, en détectant automatiquement des conditions de risque spécifiques. Ces informations permettent au viticulteur d'adapter la fréquence et le calendrier des traitements phytosanitaires, en évitant les applications inutiles et en obtenant, dans des expériences réelles, des réductions allant jusqu'à 30 % de l'utilisation de fongicides.



Figure9 . Station météorologique pour la culture. *Source : Meteosierra*

De plus, les stations climatiques permettent de prévoir des événements extrêmes tels que les gelées printanières ou les épisodes de stress thermique. Son intégration à des plateformes automatisées a permis de réduire les pertes de production de plus de 40 % grâce à l'activation précoce de systèmes antigel tels que des arroseurs ou des chauffages.

Lorsqu'elles sont intégrées à des capteurs de sol et de plantes, ces stations bouclent le cycle de sensorisation du vignoble, offrant une vision holistique, multi-échelle et prédictive qui améliore la résilience et la durabilité de la gestion viticole.

3.4 Capteurs foliaires et de sève

En viticulture de précision, il ne suffit pas de comprendre le comportement du sol : il est essentiel de savoir comment la plante réagit physiologiquement aux conditions de l'environnement. Pour ce faire, des capteurs spécialisés sont utilisés pour capturer en temps réel les indicateurs de stress et de consommation d'eau de la vigne.

Les capteurs foliaires, conçus pour mesurer la pression de turgescence des feuilles, permettent de détecter l'apparition d'un stress hydrique avant qu'il ne se manifeste dans le sol. Ce type de surveillance permet d'anticiper l'irrigation, en adaptant les décisions à la physiologie des plantes et pas seulement aux paramètres édaphiques ou climatiques. Ces dispositifs se sont révélés particulièrement utiles lors de vagues de chaleur ou de sécheresses prolongées.



Figure10 . Capteur foliaire pour la détection des pertes d'eau. Source : Um Só Planeta

D'autre part, les capteurs de flux de sève quantifient le flux d'eau transporté des racines vers la couronne. Ces données reflètent la consommation réelle d'eau de la plante et permettent d'optimiser la gestion de l'irrigation en fonction de sa demande effective. Lors d'expériences menées avec des cultivars de Chardonnay et de Cabernet Sauvignon, leur utilisation a permis de réduire la consommation d'eau sans compromettre la maturation, améliorant ainsi l'homogénéité de l'acidité et la concentration phénolique du moût.

Ces deux technologies permettent de passer d'une gestion de l'irrigation basée sur le calendrier ou les capteurs au sol à une stratégie axée sur la réponse réelle et dynamique de la plante, ce qui augmente l'efficacité de l'utilisation de l'eau et la qualité œnologique.

3.5 Plateformes intégratives et IoT agricole

La véritable utilité des technologies numériques dans la viticulture réside dans leur intégration au sein d'une architecture cohérente qui permet de transformer des données dispersées en décisions agronomiques précises et automatisées.

Les plateformes avancées combinent les informations provenant des capteurs d'humidité du sol, des stations météorologiques, des drones et des satellites dans une interface unique. Cette intégration permet de visualiser des cartes dynamiques du stress hydrique (CWSI), de la vigueur végétative, de l'état sanitaire et de la répartition des ravageurs. Sur la base d'algorithmes personnalisés, le système propose des actions de gestion telles que l'irrigation sectorisée, les applications phytosanitaires ou les alertes préventives. En outre, il peut être intégré à des systèmes d'irrigation automatisés au moyen de vannes intelligentes, qui sont activées en fonction de seuils définis.

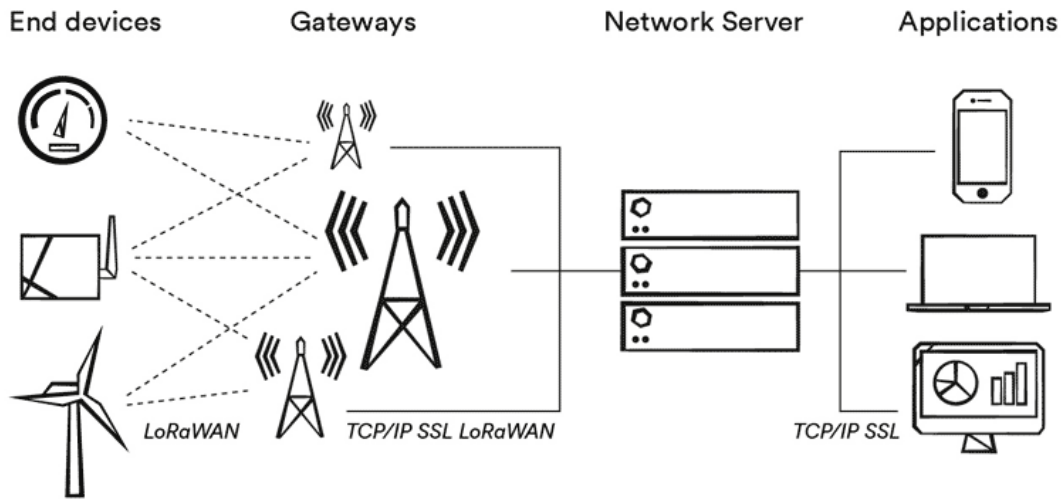

Figure11 . Système LoRaWan. *Source : Actility*

Dans les zones où la connectivité est limitée, les réseaux de communication longue portée et faible puissance (LoRaWAN) ont démontré leur capacité à maintenir les stations de surveillance en fonctionnement de manière autonome pendant plus d'un an, en transmettant des données à intervalles réguliers sans avoir besoin d'une infrastructure électrique externe.

La tendance actuelle est aux plateformes collaboratives et ouvertes, où différents acteurs du secteur partagent des informations à des fins d'analyse comparative, de surveillance territoriale ou de recherche appliquée. Cette synergie permet non seulement d'accroître l'efficacité individuelle, mais aussi de générer une intelligence collective pour la prise de décision à l'échelle régionale.

4. Modélisation prédictive et gestion avancée des données

La transformation des données agronomiques en informations exploitables est au cœur du vignoble numérique. Grâce à des systèmes de visualisation avancés et à la modélisation prédictive, les viticulteurs peuvent anticiper les tendances, évaluer les risques, planifier les tâches et améliorer les résultats qualitatifs et économiques de chaque campagne. Cette section détaille le fonctionnement de ces outils, les technologies qu'ils intègrent, les résultats qu'ils offrent et leur application pratique.

4.1 Systèmes d'information géographique (SIG) et cartes interactives

Les systèmes d'information géographique (SIG) sont un outil fondamental pour la viticulture de précision, car ils permettent d'intégrer et d'analyser plusieurs couches d'informations spatiales. Ces couches comprennent l'altimétrie, les cartes de vigueur dérivées d'indices de végétation (tels que le NDVI), la cartographie des sols, le climat local et le rendement historique des parcelles. Grâce à ces données, il est possible de générer des cartes de prescription qui délimitent des zones de gestion spécifiques (ZGS), guidant ainsi des décisions différenciées en matière d'irrigation, de fertilisation, de lutte contre les parasites ou de récolte sélective.

En Europe, il existe plusieurs exemples d'application. En Espagne, des plateformes telles que SIGPAC et le Géoportail de l'Institut géographique national permettent aux viticulteurs et aux techniciens d'accéder à des informations sur les parcelles et de les combiner avec des couches topographiques et pédologiques. En France, des régions telles que Bordeaux et la Bourgogne ont développé des systèmes de cartographie du terroir (par exemple Vitimap) qui intègrent des données climatiques et pédologiques afin de caractériser l'aptitude viticole. Au Portugal, le projet VineGIS dans la vallée du Douro combine le SIG avec des capteurs et la télédétection par satellite pour une gestion intégrée des vignobles. En Italie, des initiatives telles que WineGIS en Toscane et dans le Piémont ont permis de corréler les cépages, les conditions pédologiques et climatiques et les pratiques de gestion.

À l'échelle continentale, le programme européen Copernicus et l'imagerie satellite Sentinel-2 sont devenus une source essentielle pour la surveillance régulière des vignobles, facilitant la cartographie de la vigueur et la détection des hétérogénéités intra-parcelles. De même, des plateformes commerciales telles que Terranis (France) ou EviWine (Italie/Espagne) proposent des solutions qui intègrent le SIG, les données satellitaires et des modèles prédictifs afin d'optimiser la gestion des intrants.

Plus récemment, l'intégration d'images hyperspectrales capturées par des drones et l'utilisation de techniques d'apprentissage automatique ont permis de

détecter les zones critiques au sein des vignobles sans intervention manuelle. Ces innovations réduisent considérablement le temps d'analyse et améliorent la précision dans la délimitation des EMA, contribuant ainsi à une gestion plus durable et plus efficace des ressources dans la viticulture européenne.



Figure12 . 5e anniversaire de Sentinel - 2e Source : AIRBUS

4.2 Tableaux de bord et plateformes numériques

Les plateformes numériques actuelles ne se contentent pas de présenter des cartes statiques : elles transforment les données sensorielles et à distance en expériences visuelles interactives, accessibles depuis des ordinateurs, des tablettes ou des téléphones portables. Ces outils permettent aux viticulteurs de gérer leur vignoble de manière dynamique et en fonction de données en temps réel.

Parmi les fonctionnalités les plus pertinentes, on peut citer :

- **Des courbes temporelles interactives**, qui montrent l'évolution d'indicateurs clés tels que le NDVI, l'humidité du sol, la température ambiante ou le stress hydrique.
- **Des alertes géoréférencées**, classées par niveau de risque (faible, moyen, élevé), accompagnées de recommandations opérationnelles précises telles que « activer l'irrigation goutte à goutte dans le secteur A » ou « appliquer un traitement phytosanitaire urgent ».
- **Comparaison annuelle des campagnes**, permettant d'identifier les écarts ou les anomalies dans le développement de la culture par rapport aux années précédentes.

- **Enregistrement numérique des interventions**, telles que l'irrigation, les applications phytosanitaires ou les récoltes, avec des informations détaillées sur la date, la dose et le lieu. Ces données enrichissent le système et renforcent sa capacité à formuler des recommandations futures.

Des plateformes telles que *vite.net*® ou *AgriWebb* vous permettent de gérer l'ensemble du cycle de production depuis votre téléphone portable. En Europe, une validation pilote a montré qu'une interface conçue en collaboration directe avec les utilisateurs réduisait de 40 % le temps nécessaire à l'interprétation des informations agronomiques (CORDIS, 2023).



Figure13 . Gestion en temps réel à partir d'un appareil mobile. Source : AgriWebb

4.3 Modèles prédictifs et algorithmes d'intelligence artificielle

Prévision des performances

Dans le cadre de la viticulture de précision, **la prévision des rendements** est devenue un outil essentiel non seulement pour la planification agronomique, mais aussi pour la **gestion logistique, commerciale et financière** des exploitations viticoles. L'intégration des techniques d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond dans l'analyse de données provenant de sources multiples (images satellites, variables climatiques, capteurs de terrain et archives historiques) permet d'anticiper avec une grande précision la production de raisin et divers indicateurs de qualité à différents moments du cycle phénologique.

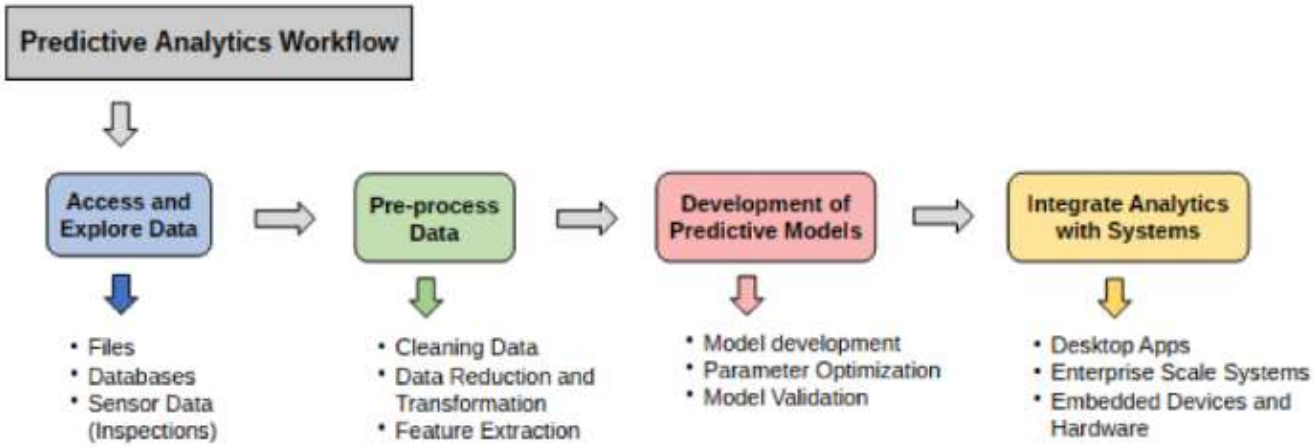

Figure14 . Flux de travail de l'analyse prédictive. *Source : Silva et al, 2021*

Prévision des performances à l'aide de réseaux neuronaux

L'une des approches les plus prometteuses pour la prédiction du rendement viticole est l'utilisation de réseaux **LSTM (Long Short-Term Memory)**, un type de réseau neuronal récurrent capable de traiter des séries chronologiques avec des données météorologiques, des indices de végétation et des dates phénologiques. Une étude menée dans **la région de l'Alto Douro (Portugal**), appliquant le LSTM à des images **Sentinel-2** (en particulier NDVI) et à des données climatiques historiques, a permis de prédire le rendement avec une **erreur absolue moyenne (MAE) de 672 kg/ha** et un **écart de 8 %** par rapport aux données réelles pendant la campagne 2020. Ce modèle a été évalué avec succès dans différentes municipalités, démontrant son utilité pour anticiper la récolte plusieurs semaines avant celle-ci (Fernandes et al., 2022).

D'autres modèles encore plus sophistiqués, tels que **CMAViT (Crop Monitoring and Assessment for Viticulture),** intègrent plusieurs couches de données : climat, gestion agronomique, imagerie satellite et connaissances d'experts. Ce modèle utilise une architecture basée sur **Vision Transformers (ViT),** un type de réseau neuronal de pointe qui traite les images comme des séquences d'informations. Lors de validations réalisées dans des régions du sud de l'Europe, **CMAViT a atteint un coefficient de détermination R^2 de 0,84 et une MAPE (erreur absolue moyenne en pourcentage) de 8,2 %,** améliorant considérablement les prévisions par rapport aux modèles classiques tels que la régression linéaire ou les arbres de décision (Gomes et al., 2023).

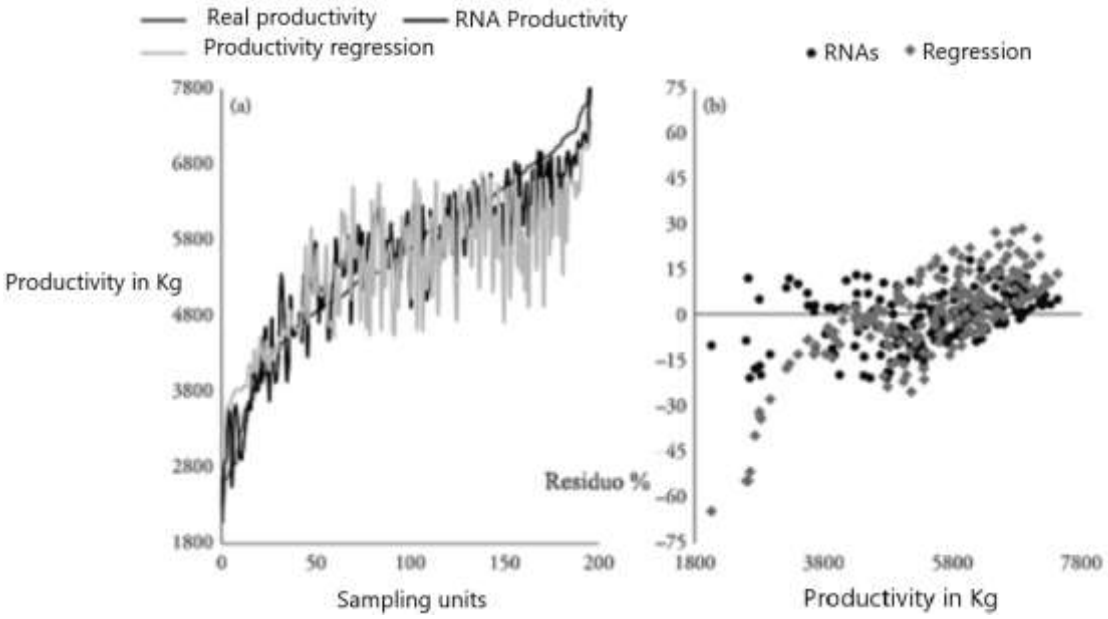

Figure15 . Modélisation prédictive des données. *Source : Eduardo Berra Villaseñor*

Détection précoce des maladies et du stress des plantes

L'identification précoce des maladies de la vigne est une autre application clé de l'intelligence artificielle dans la viticulture. Grâce au traitement d'images multispectrales capturées par des drones (UAV) mais aussi en camera embarquée (robot tracteur) et à leur analyse à l'aide de **réseaux neuronaux convolutifs (CNN),** il a été possible de détecter les symptômes naissants de maladies telles que **le mildiou (Plasmopara viticola)** ou **le botrytis (Botrytis cinerea)** avec des niveaux de précision supérieurs à **92 % au niveau du pixel**, avant même l'apparition de signes visuels dans les champs (Kerkech et al., 2020).

Ces réseaux, entraînés à partir d'images étiquetées provenant de différentes campagnes, ont démontré leur capacité à générer **des cartes de risque géoréférencées**, ce qui permet des interventions phytosanitaires localisées, réduisant ainsi l'utilisation inutile de fongicides et améliorant la traçabilité sanitaire du vignoble.

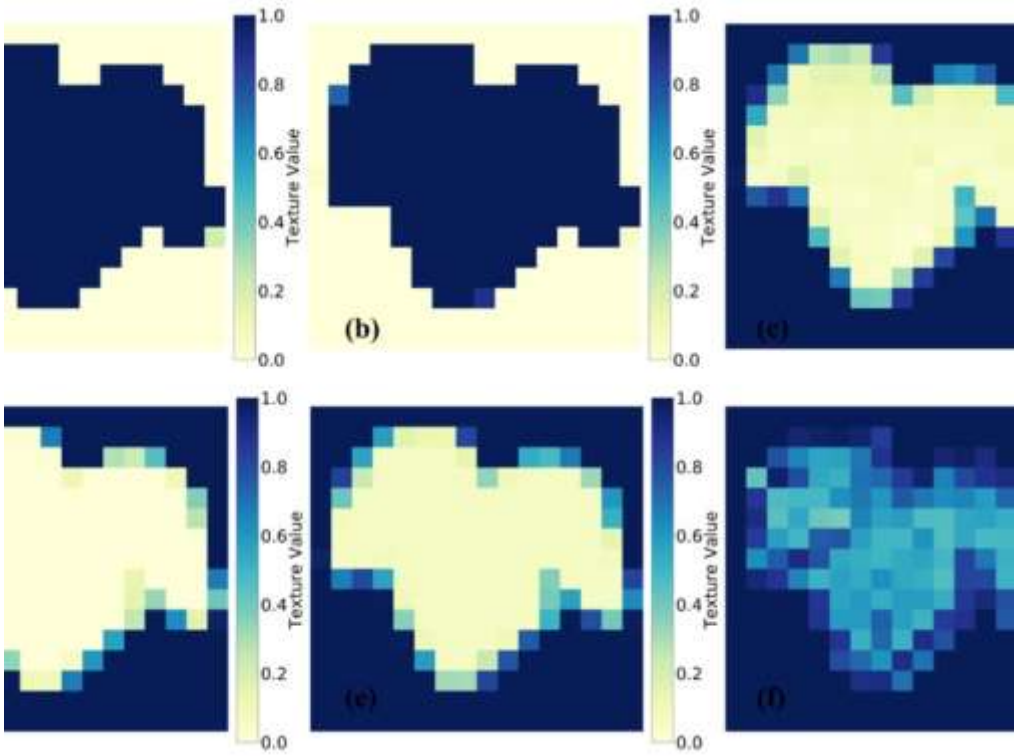

Figure16 . Diagnostic des maladies foliaires à l'aide de l'IA. Source : Elsherbiny et al.

Estimation de la qualité des fruits

Outre le rendement et la santé du vignoble, l'intelligence artificielle a également été appliquée à la **prédiction des paramètres de qualité des fruits**, en particulier la teneur en sucre **(°Brix), l'acidité totale, les polyphénols** et le potentiel aromatique. En corrélant des images NDVI multitemporelles capturées par des drones, des capteurs foliaires et des données analytiques de laboratoire, plusieurs études ont réussi à estimer la valeur de ces indicateurs.

Dans une expérience récente, **des algorithmes AutoML (apprentissage automatique automatisé) ont été utilisés** pour prédire le °Brix à partir du NDVI enregistré à différentes stades phénologique. Des algorithmes tels que **les machines à vecteurs de support (SVM), la régression polynomiale** et **le régresseur Extra Trees** ont fourni des coefficients de détermination compris entre **R^2 = 0,44 et 0,53**, des résultats jugés acceptables compte tenu de la grande variabilité physiologique et pédologique des parcelles du vignoble (Silva et al., 2021). Bien qu'ils en soient encore à la phase expérimentale, ces modèles pourraient permettre une **récolte différentielle en termes de qualité**, en orientant les grappes optimales vers des vinifications haut de gamme et en optimisant la rentabilité du vignoble.

4.4 Cartes de prescription et technologie VRT

Les modèles prédictifs **appliqués à la viticulture** ne génèrent pas seulement des informations analytiques, mais aboutissent également à un outil opérationnel essentiel : **les cartes de prescription**. Ces cartes numériques représentent la **traduction spatiale des analyses de données**, indiquant **les doses spécifiques d'intrants** (tels que l'eau, les engrais ou les produits phytosanitaires) adaptées aux **zones de gestion spécifiques (ZGS)** du vignoble. Il s'agit de l'une des applications les plus avancées et les plus concrètes de la viticulture de précision, où la collecte de données est directement convertie en actions différenciées sur le terrain.

Ces cartes, généralement générées à l'aide de plateformes SIG (systèmes d'information géographique), peuvent être exportées dans des formats compatibles avec les machines agricoles modernes (par exemple, des fichiers de forme ou GeoTIFF) et **importées directement dans des tracteurs, des pulvérisateurs ou des équipements de fertigation équipés de** systèmes **VRT (Variable Rate Technology)**. Ainsi, chaque zone du vignoble reçoit le traitement exact dont elle a besoin, selon le diagnostic généré par des capteurs, des modèles ou des images satellites.

Avantages et résultats vérifiés

De nombreuses études menées en Europe et en Amérique ont démontré les avantages tangibles de l'utilisation de cartes de prescription avec la technologie VRT dans la pratique viticole. Par exemple, des recherches menées par le **Centre commun de recherche (CCR) de l'Union européenne** dans des vignobles en Espagne, en Italie et en Allemagne ont mis en évidence **une réduction moyenne de 20 à 30 % de l'utilisation d'engrais et de produits phytosanitaires**, ainsi qu'une diminution du **ruissellement de surface et de la contamination diffuse des eaux souterraines** (Vendrell et al., 2020). L'application localisée a également favorisé une **meilleure homogénéité dans la vigueur et le rendement du vignoble**, contribuant ainsi à une meilleure qualité œnologique.

En **Argentine**, des expériences menées dans la province de Mendoza avec des tracteurs équipés de doseurs VRT – alimentés par des cartes d'azote générées par des drones et des données provenant de capteurs foliaires – ont permis de **réduire de 25 % l'application d'engrais azotés,** sans affecter le développement végétatif ni la qualité des raisins. En outre, une augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'azote (NUE) a été observée, avec des pertes par lessivage plus faibles (Castro et al., 2021).

Par ailleurs, au **Chili et dans le sud de la France**, l'utilisation de **pulvérisateurs intelligents** couplés à des caméras de vision artificielle a permis de détecter les feuilles malades présentant les premiers symptômes de l'oïdium et du

mildiou. Cette détection a activé les vannes d'application uniquement dans les zones touchées, ce qui a permis **de réduire jusqu'à 40 % le volume de fongicides utilisés**, sans compromettre le contrôle sanitaire de la culture (Guillén et al., 2022). Cette technique contribue également à réduire les déchets dans les produits finaux et améliore la durabilité du processus de vinification.

Ces expériences montrent comment la combinaison de **la modélisation,** de **la cartographie numérique et** de **la mécanisation avancée** permet non seulement d'optimiser les intrants, mais aussi d'introduire un nouveau paradigme opérationnel dans la viticulture : une gestion personnalisée, efficace et respectueuse de l'environnement.



Figure17 . Distributeur automatique Green Patrol pour la lutte contre les parasites. Source : SmartProtect

4.5 Action automatisée : relier la prédiction à l'intervention

Le stade le plus avancé de la viticulture numérique est atteint lorsque le **cycle de gestion des informations agronomiques** est complètement bouclé, c'est-à-dire lorsque les données collectées par des capteurs et traitées par des modèles prédictifs **conduisent à des décisions automatisées ou semi-automatisées**, exécutées directement dans le vignoble grâce à des systèmes connectés. Cette approche, connue sous le nom de **« des données à l'action »,** représente le summum de la gestion précise du vin, combinant surveillance en temps réel, intelligence artificielle et automatisation agricole.

Dans ce modèle, **les systèmes d'aide à la décision (DSS)** ne sont plus seulement des outils de consultation et d'analyse, mais plutôt **des plateformes** opérationnelles **capables d'activer des dispositifs physiques**, des vannes d'irrigation aux récolteuses automatiques. Cela **permet des réponses immédiates, objectives et constantes basées sur les données**, éliminant les retards et réduisant la dépendance à l'observation manuelle ou à l'interprétation subjective.

Exemples fonctionnels d'automatisation intelligente

1. **Activation automatique de l'irrigation :** dans de nombreux vignobles technicisés, **les vannes d'irrigation goutte à goutte sont reliées à des stations météorologiques et à des capteurs d'humidité du sol**. Ces vannes reçoivent des signaux du DSS lorsque les niveaux d'humidité descendent en dessous des seuils prédéfinis, déclenchant l'irrigation uniquement dans les ZME nécessaires et pendant la durée nécessaire. Des plateformes telles que **SmartVitis** et **iRooM** intègrent déjà cette fonctionnalité dans des vignobles en Italie et en Californie, permettant des économies d'eau pouvant atteindre **30 % sans réduire le rendement ou la qualité** (Matese & Di Gennaro, 2021).



Figure18. Irrigation automatisée. Source : verdeesvida

2. **Alertes automatiques et activation des machines :** les systèmes avancés de gestion agricole envoient **des notifications immédiates des risques phytosanitaires détectés par des modèles prédictifs**, tels que les conditions favorables au mildiou ou au botrytis. Ces alertes peuvent être configurées pour déclencher directement **des pulvérisateurs autonomes ou des tracteurs guidés par GPS**, si l'opérateur l'autorise, ou permettre au technicien responsable de prendre des décisions éclairées en temps réel. Le système **CropX**, qui intègre l'analyse du couvert végétal, les données

climatiques et les prévisions pour générer des alertes déclenchables au niveau des parcelles, en est un exemple (CropX, 2023).



Figure19 . Outil agricole pour la notification des alertes. Source : Cropx

3. **Récolte segmentée en fonction de la maturité différentielle : la récolte** sélective **par zones de maturité** est une autre application importante. Le DSS, qui utilise l'imagerie NDVI et des capteurs optiques mesurant **les indices de couleur, de chlorophylle et de solides solubles (°Brix)**, peut identifier le moment où chaque ZME a atteint sa maturité optimale. Cela permet de programmer la récolte par phases, voire **d'activer des moissonneuses automatisées équipées de caméras hyperspectrales** qui sélectionnent les grappes mûres en temps réel. Certains modèles de **récolteuses intelligentes, comme la New Holland Braud 9090X,** intègrent déjà des capteurs de qualité des fruits qui permettent ce type d'automatisation avancée (New Holland, 2022).



Figure20 . Capteur de chlorophylle SCF pour la mesure in situ dans les champs. Source : innova

Projets européens pionniers

Des projets européens tels que **AI GRAPE,** développés conjointement par des centres de recherche en **Italie et** en **Slovénie**, sont en phase de mise en œuvre d'une plateforme complète qui unifie toutes ces capacités : capteurs dans les champs, analyse par intelligence artificielle et **automatisation de tâches telles**

que l'irrigation, l'application de produits phytosanitaires et la récolte. Son objectif est de créer un écosystème complètement fermé, où les décisions agronomiques sont exécutées sans intervention humaine , tout en maintenant la traçabilité et l'enregistrement dans le cloud (CORDIS, 2023).

Cette transition vers l'automatisation intelligente représente la prochaine étape dans l'évolution des vignobles numériques. Elle permet non seulement de réduire les coûts et de minimiser les erreurs humaines, mais aussi de **réagir plus rapidement et avec plus de précision aux conditions changeantes**, telles que les sécheresses, les pluies imprévues ou les épidémies. L'intégration de ces technologies renforce la durabilité du système de production et l'adapte mieux aux défis climatiques et commerciaux du XXIe siècle.

4.6 Études de cas complètes

La mise en œuvre des technologies agricoles numériques dans les vignobles européens génère des résultats tangibles qui démontrent la valeur pratique de l'intégration des capteurs, des algorithmes prédictifs et de l'automatisation. Voici deux cas remarquables de **viticulture de précision** dans la péninsule ibérique : l'un à l'échelle d'une parcelle dans **la Ribera del Duero (Espagne)** et l'autre au niveau régional dans la **région viticole du Douro (Portugal).**

Cas n° 1 : vignoble technicisé à Ribera del Duero (Espagne)

Dans un vignoble haut de gamme de la Ribera del Duero, un système complet de surveillance et de gestion intelligent a été mis en place au cours de trois campagnes consécutives. La conception comprenait :

1. **Des capteurs de sol et des stations météorologiques locales**, installés pour enregistrer en continu des données sur l'humidité, la température, la conductivité et les précipitations, avec une lecture toutes les 15 minutes.
2. **Des images hebdomadaires obtenues par des drones (UAV)** équipés de caméras multispectrales, permettant le calcul d'indices de végétation tels que le NDVI et le SAVI en haute résolution (2,5 cm/pixel).
3. **Application d'algorithmes de réseaux neuronaux LSTM (Long Short-Term Memory)**, entraînés à partir de données historiques sur le climat, la phénologie et les récoltes précédentes, capables de prédire le rendement et l'apparition de maladies.
4. **Génération de cartes de prescription** pour l'ajustement de l'irrigation et des produits phytosanitaires en fonction de zones de gestion spécifiques (EMZ).

5. **Automatisation de l'irrigation** à l'aide de vannes connectées à la plateforme d'aide à la décision (DSS) et de **pulvérisateurs VRT** capables d'adapter les doses en temps réel.
6. **Tableau de bord mobile de gestion intégrée**, où toutes les actions effectuées ont été enregistrées, avec traçabilité de la date, de la dose, de la localisation GPS et de l'opérateur.

Les résultats quantifiés après deux ans d'utilisation ont montré des améliorations significatives :

- **Réduction de la consommation d'eau de 30 %,** grâce à une programmation de l'irrigation basée sur le stress hydrique et l'état phénologique.
- **Réduction de 25 % de l'utilisation de fongicides,** grâce à des applications sélectives guidées par des modèles prédictifs.
- **Augmentation de l'homogénéité du rendement du vignoble**, avec une amélioration moyenne de **+12 % en kg/ha**, en particulier dans les sols à faible capacité de rétention.
- **Reconnaissances dans les concours régionaux de qualité**, où les vins produits ont obtenu des notes supérieures dans les évaluations sensorielles et les fiches techniques.

Ce cas illustre le potentiel d'une viticulture numérique entièrement intégrée, où l'action agronomique est ajustée en temps réel en fonction des données physiologiques, climatiques et spatiales (González-Fernández et al., 2022 ; Matese & Di Gennaro, 2021).



Figure21 . Utilisation de drones dans les vignobles de la Ribera del Duero. *Source : Computing*

Cas n° 2 : Modèle de prévision régional dans la région du Douro (Portugal)

À plus grande échelle, **l'Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária (INIAV)** au Portugal a développé un modèle de prévision du rendement viticole pour la région **de l'Alto Douro**, à l'aide d'images satellites et de l'apprentissage profond. Le système appelé **InfoSolo** combinait :

- Des images multitemporelles **Sentinel-2** avec des indices de végétation (NDVI) extraits pendant les phases de floraison et de véraison.
- Des variables météorologiques historiques et en temps réel (température moyenne, rayonnement solaire, accumulation de degrés-jours).
- Des modèles d'apprentissage avec des réseaux neuronaux LSTM, capables de capturer des séquences temporelles non linéaires.

Les résultats ont indiqué une **erreur absolue moyenne (MAE) de 672 kg/ha**, soit un **écart relatif de 17 %.** Lorsque les prévisions ont été faites au moment de la véraison, la précision s'est améliorée avec **des** erreurs **inférieures à ±8 %,** ce qui est suffisant pour des utilisations opérationnelles telles que la logistique des vendanges et la planification macroéconomique régionale (Fernandes et al., 2022).

Ces modèles ont été testés dans plusieurs communes viticoles et se sont révélés évolutifs, permettant d'établir **des cartes des performances anticipées** au niveau régional. Cela a facilité **la planification des transports, l'organisation des entrepôts et l'anticipation des contrats de vente**, ainsi que la validation des assurances agricoles.



Figure22 . Système de cartographie InfoSolo. Source : InfoSolo

4.7 Avantages et défis dans la pratique

L'adoption des technologies numériques et des systèmes d'aide à la décision dans le secteur viticole transforme radicalement les processus de production, de gestion et de commercialisation du vin. La mise en œuvre de capteurs, de modèles prédictifs, de plateformes intégrées et d'automatisation permet non seulement d'améliorer l'efficacité opérationnelle, mais aussi d'introduire une nouvelle culture de travail basée sur des données objectives et une prise de décision éclairée.

Avantages immédiats et vérifiables

1. **Prise de décision basée sur des données réelles :** l'un des avantages les plus tangibles du vignoble numérique est **l'abandon progressif de l'intuition subjective** ou **de** l'expérience non systématisée, au profit d'**une prise de décision basée sur des données empiriques, mesurées et analysées**. Cela permet de mener des actions agronomiques avec plus de précision, de cohérence et de traçabilité, ce qui améliore à la fois la gestion et les résultats de chaque campagne (Matese & Di Gennaro, 2021 ; Bramley, 2009).

2. **Réduction significative de l'utilisation des ressources :** diverses études montrent que l'application des technologies de précision permet de réduire l'utilisation des intrants agricoles (eau, engrais, produits phytosanitaires) **de 20 % à 40 %,** selon le degré d'intégration technologique. Cette efficacité permet non seulement de réduire les coûts économiques, mais aussi **d'atténuer les impacts négatifs sur l'environnement**, tels que la pollution diffuse ou la surexploitation des ressources naturelles (Vendrell et al., 2020).

3. **Amélioration de la qualité et de la durabilité des fruits :** la possibilité d'intervenir de manière localisée, en fonction des besoins de chaque zone du vignoble, **optimise l'équilibre végétatif-reproductif de la vigne**, améliore la qualité des raisins (concentration plus élevée en sucres, anthocyanes, acidité équilibrée) et favorise une **production plus durable et plus résiliente** face au changement climatique (González-Fernández et al., 2022).

4. **Capacité d'anticipation logistique et commerciale :** les modèles prédictifs de rendement et de maturité permettent **de planifier la récolte à l'avance**, de mieux gérer la main-d'œuvre et d'anticiper les accords commerciaux. Ils facilitent également la programmation en cave (réception, fermentation, pressurage) et la **négociation des contrats d'achat et de vente** sur la base de données vérifiées et non d'estimations subjectives (Fernandes et al., 2022).

Défis techniques et organisationnels restants

1. **Intégration efficace entre le matériel, les logiciels et les machines Malgré les progrès technologiques, l'un des principaux défis reste l'interopérabilité entre les appareils et les plateformes**. Les capteurs provenant de différentes sources d' , les logiciels d'analyse, les machines VRT et les systèmes de gestion doivent être correctement intégrés afin que le flux d'informations soit continu et fiable (Matese et al., 2022). L'absence de normes universelles dans le secteur agricole rend cette tâche difficile.

2. **Capacité de traitement et de stockage en temps réel Le volume de données générées par les vignobles connectés est important, ce qui nécessite des infrastructures de traitement des données dans le cloud**, des systèmes informatiques de pointe ou des réseaux à faible latence. Pour prendre des décisions en temps réel, par exemple en cas d'alerte au gel ou de recommandation d'irrigation, le système doit fonctionner avec une haute disponibilité et un délai minimal (CropX, 2023).

3. **Développement d'interfaces conviviales et intuitives Les tableaux de bord et les visualisations sont souvent conçus par des développeurs sans expérience agronomique, ce qui les rend difficiles à utiliser par les techniciens de terrain. Une co-création entre les utilisateurs finaux et les concepteurs est donc nécessaire**, basée sur les principes de convivialité et de conception centrée sur l'utilisateur. Dans des projets tels que **vite.net®**, il a été démontré que des interfaces bien conçues **réduisent le temps d'interprétation des données jusqu'à 40 %** (CORDIS, 2021).

4. **Formation continue du personnel et étalonnage du système La technologie seule ne suffit pas à transformer la gestion viticole. Une formation spécifique est essentielle pour interpréter les données**, comprendre les cartes de prescription, étalonner les capteurs et ajuster les paramètres. En outre, les capteurs doivent **être réétalonnés périodiquement** afin de maintenir la précision des mesures, en particulier dans des conditions climatiques variables (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004).

5. Systèmes d'aide à la décision (DSS) dans la viticulture de précision

À l'ère de la transformation numérique de l'agriculture, **les systèmes d'aide à la décision (DSS)** se sont imposés comme le cœur opérationnel de la viticulture de précision. Leur fonction est d'intégrer, de traiter et d'analyser des informations complexes provenant du vignoble, afin de générer **des recommandations agronomiques objectives, opportunes et personnalisées**. Ces systèmes constituent la structure cognitive qui permet **de transformer les données en connaissances** et les connaissances en actions, au service d'une production viticole plus efficace, durable et résiliente (Gómez-Candón et al., 2020 ; Matese & Di Gennaro, 2021).

5.1 Qu'est-ce qu'un DSS et à quoi sert-il ?

Un DSS peut être défini comme une **plateforme technologique qui combine des modèles prédictifs, des algorithmes agronomiques et des données en temps réel** pour générer des instructions pratiques et automatisées sur le terrain. À titre d'exemple : un DSS conçu pour un domaine viticole peut, en début de journée, collecter des variables telles que l'humidité du sol, la température de l'air, les prévisions météorologiques, les images satellite ou drone et l'agenda opérationnel de l'équipe de terrain. Sur la base de ces informations, le système applique des modèles phénologiques, des seuils de stress hydrique, des prévisions de maladies et des stratégies agronomiques prédéfinies pour émettre des recommandations tactiques telles que :

- « Appliquer 8 mm d'irrigation dans la zone de gestion spécifique (ZME) 3. »
- « Risque moyen de mildiou dans les parcelles exposées au nord. »
- « Vérifier la maturité phénologique dans les rangées 12 à 16 dès demain matin. »

Cette capacité à synthétiser et à exécuter en temps réel fait du DSS un **assistant agronomique numérique**, capable de fonctionner avec des niveaux de précision et de rapidité inaccessibles pour le travail manuel ou l'intuition traditionnelle (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004 ; Finger et al., 2019).

Cependant, la portée d'un DSS va au-delà de l'exécution tactique. Ces systèmes servent également de **référentiels d'informations historiques** : ils enregistrent chaque intervention effectuée (date, dose, machines utilisées, opérateur responsable), ce qui permet **de réaliser des analyses comparatives entre les campagnes, les cépages ou les parcelles**. Grâce à l'accumulation de données et aux principes de l'apprentissage automatique, les DSS peuvent s'améliorer au fil du temps : ils ajustent les seuils d'action, recalibrent les modèles et personnalisent davantage leurs recommandations en fonction de l'historique du

vignoble et des réponses observées à chaque cycle de production (Pérez-Delgado et al., 2023).

L'objectif ultime de ces systèmes est de faciliter la transition d'**une viticulture réactive**, qui répond aux problèmes une fois qu'ils sont détectés, vers **une viticulture** proactive **et prédictive**, qui **anticipe les risques, planifie à l'avance et optimise les ressources**. En ce sens, les DSS constituent un pont entre l'agriculture de précision et les concepts émergents **d'agriculture intelligente et de viticulture 5.0**, où convergent la durabilité, l'efficacité et la numérisation (Zarco-Tejada et al., 2014 ; Finger et al., 2019).

Parmi les différents exemples d'application de la SDM dans la viticulture, on peut citer des plateformes telles que **Vite.net®**, développée par Horta srl en Italie, ou **SmartVitis**, un projet coordonné par l'université de Florence, qui a été validé dans des vignobles en Toscane, dans la Rioja et en Bourgogne. Ces deux solutions intègrent des capteurs climatiques, des images multispectrales, des modèles phénologiques et des cartes de prescription, permettant d'agir avec une précision sans précédent à toutes les étapes du cycle viticole. D’autres exemples en France existent tels que sencrop.com ou decitrait (decitrait.vignevin-epicure.com).

La liste des exemples est bien entendu non exhaustive.



Figure23 . Indicateurs de risque DSS Vite.net. Source : Vite.net

5.2 Architecture technique d'un DSS viticole

Un **système d'aide à la décision (DSS)** en viticulture numérique organise la transformation des données en actions opérationnelles de manière structurée. Ce flux peut être divisé en six étapes principales, chacune ayant un objectif fondamental dans la gestion agronomique :

1. Capture multisensorielle

La première étape consiste à collecter des informations provenant de diverses sources physiques :

- **Capteurs de sol** : capacitifs, tensiométriques ou FDR, utiles pour mesurer l'humidité et la conductivité électrique (Ojha et al., 2015).

- **Capteurs in situ supplémentaires** : par exemple, des capteurs de pression foliaire (LeafSen), des capteurs de flux de sève ou de pH, qui renseignent sur l'état physiologique de la vigne (LeafSensor, 2023 ; Steppe et al., 2008).
- **Stations climatiques** : pour surveiller la température, l'humidité, le vent, le rayonnement et les précipitations (Jones et al., 2010).
- **Imagerie à distance** : par satellite (Sentinel-2), drones multispectraux et imagerie thermique, qui permettent de calculer des indices tels que le NDVI ou le CWSI (Delegido et al., 2011 ; Matese & Di Gennaro, 2015).
- **Données manuelles** : telles que les dates de taille, les variétés, les types de traitement, la densité des vignes, entre autres.

La combinaison de ces sources génère des ensembles de données riches et hétérogènes qui alimentent le système de gestion.

2. Prétraitement des données

Avant d'être analysées, les données doivent être traitées :

- **Détection et correction des valeurs anormales**.
- **Étalonnage périodique des capteurs** pour ajuster les biais ou les dérives (Ammoniaci et al., 2021).
- **Interpolation temporelle et spatiale** pour normaliser la résolution des données.
- **Conversion des unités** aux normes opérationnelles (mm, °C, etc.).

Cette étape garantit que les données sont cohérentes, comparables et adaptées au traitement.

3. Moteur de calcul

Des routines algorithmiques traitent les données prétraitées à l'aide :

- **Des règles agronomiques claires** telles que les degrés-jours (GDD) et les modèles phénologiques basés sur les phases BBCH (Brisson et al., 2003).
- **Des systèmes d'alerte phytosanitaire** tels que l'indice Gubler-Thomas ou les modèles EPI pour le botrytis et le mildiou (Gubler et al., 1999).
- **Des modèles prédictifs via l'IA :** apprentissage automatique (ML) ou apprentissage profond (DL) pour estimer le stress hydrique, l'incidence des ravageurs ou le rendement (Fernandes et al., 2022 ; Kerkech et al., 2020).
- **Génération de cartes de prescription** pour l'irrigation et les traitements à taux variable (VRT) en fonction de zones spécifiques (Ammoniaci et al., 2021).

Cela génère des informations hiérarchiques entre le diagnostic et la recommandation opérationnelle.

4. Moteur d'action

Les résultats sont transformés en actions concrètes :

- **Exportation de cartes VRT** vers des tracteurs, des fertilisateurs ou des pulvérisateurs, courants dans les équipements agricoles modernes (Ammoniaci et al., 2021).
- **Notifications automatisées**, envoyées par téléphone portable, e-mail ou Internet, indiquant quand et où intervenir dans les champs.
- **Activateurs automatiques** qui gèrent l'irrigation ou les vannes d'arrosage directement par le biais de signaux numériques.

Grâce à cette structure, le DSS cesse d'être consultatif et devient un **exécutant partiel automatique**.

5. Interface utilisateur (UX/HMI)

L'interaction avec le système doit être claire et efficace :

- **Visualisations intuitives**, y compris des cartes interactives et des courbes temporelles du NDVI, de l'humidité, du stress hydrique, etc. (Ammoniaci et al., 2021).
- **Notifications classées par catégorie** (« urgent », « à revoir », « normal »), qui aident à hiérarchiser les actions.
- **Enregistrement géolocalisé des activités** : irrigation, traitements ou récolte, avec traçabilité complète et accès à l'historique des campagnes.

Une bonne expérience utilisateur garantit l'utilité et l'adoption par les techniciens et les viticulteurs.

6. Effet dynamique et apprentissage continu

Les systèmes DSS fonctionnent selon une **boucle de rétroaction constante dans l'exemple ci-dessous** :

- Ils vérifient les résultats de chaque action (par exemple, la réponse au traitement ou l'état de l'eau après l'irrigation).
- Ils affinent leurs seuils et ajustent leurs modèles en fonction de l'efficacité observée.
- Ils intègrent de nouvelles données dans l'historique, ce qui permet d'ajuster et d'améliorer progressivement les algorithmes (PérezDelgado et al., 2023).

Ce cycle fait du DSS un outil qui non seulement exécute, mais **apprend et évolue**.

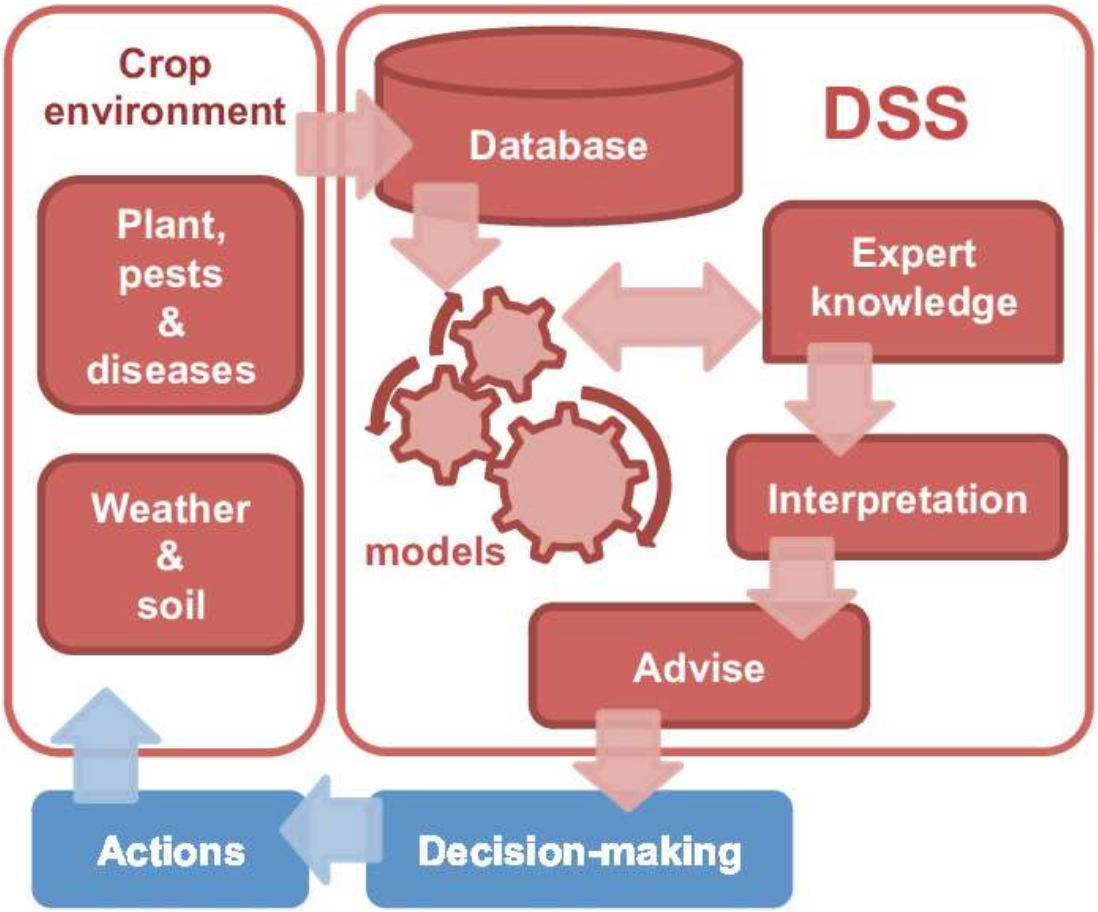

Figure24 . Exemple de DSS pour le traitement des maladies dans les cultures. *Source : Vittorio et al. 2012*

5.3 Modèles et algorithmes utilisés dans le DSS

Modélisation phénologique et analyse de maturité

La modélisation phénologique combine plusieurs sources d'informations – température cumulée (GDD), dates traditionnelles de germination et de maturation, données satellitaires – pour définir une **période de récolte** flexible de 57 jours au lieu d'une date fixe. Cette approche améliore l'adaptation de la récolte aux conditions climatiques de l'année, facilitant ainsi la prise de meilleures décisions en matière de récolte (Chuine et al., 2013 ; Basile et al., 2023).

Modélisation des risques phytosanitaires

Les règles de base traditionnelles, telles que **GublerThomas** et **l'indice de risque épidémiologique (EPI),** ont été enrichies par l'intégration de l'intelligence artificielle. Ces nouveaux systèmes intègrent des variables telles que la température, l'humidité, l'évapotranspiration d' e et le microclimat par ZME, générant **des alertes automatiques** qui évitent les applications inutiles de

fongicides. Dans certains cas, leur utilisation a été réduite jusqu'à **32 %,** sans compromettre la protection de la santé (Gubler et al., 1999 ; Ayaz et al., 2019).

Modélisation du stress hydrique

La modélisation du bilan hydrique du vignoble, combinée à des capteurs d'humidité du sol et de pression foliaire, permet d'anticiper les déficits et de déclencher l'irrigation avant que la plante ne soit stressée. Cette approche a permis de réduire la consommation d'eau de **15 à 20 %,** permettant une réponse précoce et ciblée (LeafSensor, 2023 ; Steppe et al., 2008).

Prévision des performances

Les variables de capteurs, les données météorologiques, les séries historiques et les données de drones sont intégrées dans des modèles tels que **Random Forest** ou **LSTM.** Dans la Rioja Alavesa, un modèle LSTM a atteint une **précision de 87 %** dans l'estimation du nombre de kilogrammes de raisins par hectare à partir des données de plusieurs campagnes (Fernandes et al., 2022).

Détection automatique des ravageurs et des maladies

L'utilisation de **réseaux neuronaux convolutifs (CNN)** appliqués à des images multispectrales permet d'identifier les taches foliaires, le mildiou, l'oïdium ou le botrytis avec **une fiabilité** supérieure à **90 %**, activant ainsi des seuils d'intervention automatique (Kerkech et al., 2020 ; Ayaz et al., 2019).

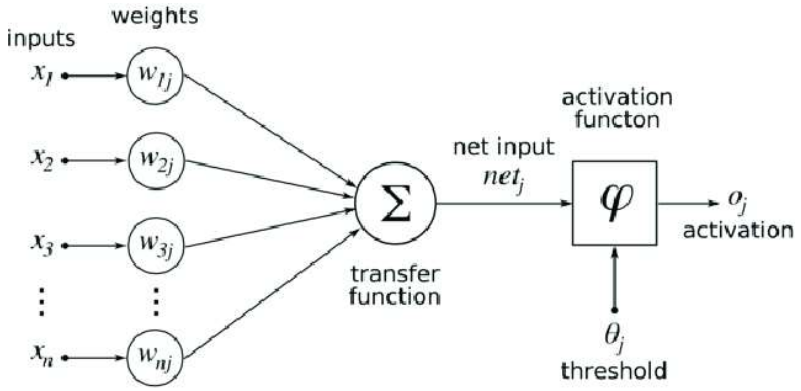

Figure25 . Représentation schématique d'un neurone artificiel. Source : Ünal, Z. 2020.

5.4 Expériences réelles et résultats sur le terrain

Le développement et la mise en œuvre de systèmes d'aide à la décision (DSS) ont révolutionné la gestion viticole en permettant l'intégration de technologies de saisie de données, d'analyse prédictive et de visualisation, les

transformant en actions agronomiques concrètes d' . Voici quelques-uns des projets et plateformes les plus représentatifs qui illustrent leur potentiel d'application :

Projet VINTAGE

Ce projet européen mis en œuvre dans des régions viticoles clés telles que **La Rioja (Espagne), la Toscane (Italie) et la Bourgogne (France)** a donné des résultats exceptionnels en termes d'efficacité. Le système a intégré des modules d'irrigation intelligente, de santé des plantes et de récolte différenciée, avec une réduction des intrants de **20 à 30 %** grâce à des techniques de récolte segmentées, des traitements juste à temps et l'utilisation de capteurs en temps réel (CORDIS, 2022).

L'un des points clés a été la conception de son **interface conviviale**, développée et testée en collaboration avec les viticulteurs locaux. Grâce à cela, le système a atteint un taux d'adoption élevé, démontrant que **la facilité d'utilisation est un facteur déterminant** dans l'intégration des solutions numériques dans les petites et moyennes exploitations agricoles.



Figure26 . Projet VINTAGE

VineSens

Un système DSS modulaire axé sur les vignobles familiaux et les petits producteurs, développé par un consortium espagnol. Ce système combine **des capteurs d'humidité, de température, de pression et de paramètres environnementaux**, ainsi qu'un moteur de règles agronomiques simple, le tout intégré dans une plateforme web facile à utiliser.

Dans le cadre d'une application à La Rioja, **VineSens a permis de réduire la consommation d'eau de 18 %** sans compromettre la santé du vignoble, même dans des conditions météorologiques défavorables (VineSens, 2020). Le système démontre que même avec des ressources limitées, il est possible d'appliquer les principes de la viticulture de précision de manière efficace et économique.

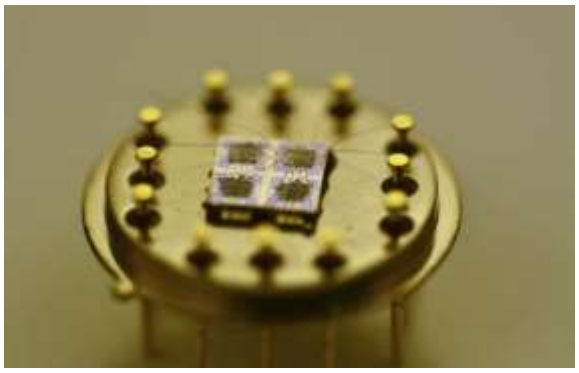

Figure27 . Intégration des capteurs VinesSens. *Source : Dani Ortega*

GrapeDSS

Une plateforme commerciale évolutive utilisée sur plusieurs continents, conçue pour les vignobles de toutes tailles. Ses modules comprennent :

- **Des modèles de nutrition équilibrée**, adaptés au sol et au cépage.
- **Sélection de porte-greffes** optimisée pour les conditions climatiques et pathologiques locales.
- **Planification de la fumigation** basée sur les alertes phytosanitaires, le NDVI et la météorologie.

Sa **conception axée sur le mobile** le rend particulièrement utile dans les régions où l'on utilise beaucoup les appareils mobiles et l'accès à distance. De plus, il permet d'exporter directement les cartes VRT vers les machines connectées, ce qui facilite la gestion agronomique différenciée.

Figure28 . Projet GrapeDSS

Projet AI-GRAPE

Projet transnational axé sur l'utilisation de l'intelligence artificielle pour **la détection précoce des ravageurs** et la gestion agronomique optimisée. Il repose sur l'utilisation combinée de **drones, de capteurs de terrain et de réseaux neuronaux convolutifs** pour identifier les symptômes de maladies telles que l'oïdium, le mildiou ou le botrytis, avant qu'ils ne soient visibles à l'œil nu.

Actuellement en phase avancée de validation, le projet vise à **réduire de 20 % l'utilisation de pesticides** et à **augmenter de 15 % le rendement** sur une période de 24 mois (CORDIS, 2023). L'accent mis sur la durabilité et la réduction

des interventions chimiques en fait un modèle clé pour la transition écologique en viticulture.



Figure29 . Projet AI-GRAPE

WANUGRAPE 4.0

Développement espagnol axé sur la création d'un **système d'aide à la décision modulaire et intégré**, capable de fonctionner dans des vignobles présentant différents niveaux de numérisation. Le système se distingue par :

- Inclure **des modèles de prévision de l'eau et de la nutrition**, même en l'absence de capteurs directs.
- Utiliser des algorithmes adaptés aux **variétés indigènes** et aux conditions locales.
- L'intégration d'une logique d'apprentissage continu grâce à l'analyse historique des campagnes.

Ce système d'aide à la décision fournit une estimation fiable de l'état hydrique et nutritionnel à partir d'un minimum de données, en utilisant l'interpolation et des règles empiriques validées sur le terrain, ce qui le rend idéal pour la viticulture dans les zones rurales disposant d'une infrastructure technologique moins développée.



Figure30 . Présentation des résultats du projet WANUGRAPE 4.0. *Source : Inagea*

5.5 Facteurs essentiels de réussite d'un DSS

Pour **qu'un système d'aide à la décision (DSS)** soit véritablement transformateur dans le contexte viticole, il doit être efficacement intégré à la réalité agronomique, sociale et technique e de l'exploitation. Les éléments clés qui déterminent son efficacité sont détaillés ci-dessous :

1. Qualité constante des données

Les performances du système dépendent directement de la **fiabilité et de la cohérence des données** collectées. Cela implique **un étalonnage régulier des capteurs**, **une vérification physique** des relevés sur le terrain et la mise en œuvre de procédures automatiques pour détecter et éliminer les valeurs aberrantes ou les anomalies (Ammoniaci et al., 2021). Sans données précises, les recommandations peuvent ne plus correspondre à la réalité, ce qui réduit la confiance des utilisateurs.

2. Modélisation territoriale spécifique

Chaque exploitation agricole possède **des microsystèmes uniques**, définis par les sols, les cépages, les porte-greffes et les conditions microclimatiques locales. Pour maximiser la précision, les modèles doivent être **personnalisés pour chaque contexte** : calibrés au niveau de la ZME (zone de gestion spécifique), adaptés aux modèles phénologiques locaux et ajustés en fonction du cycle saisonnier (Matese & Di Gennaro, 2015).

3. Interface intuitive et utilisable

L'adoption effective des DSS dépend en grande partie de **l'expérience utilisateur (UX).** L'interface doit offrir des tableaux de bord clairs, des visualisations interactives, un accès à distance depuis des appareils mobiles et une ergonomie développée en **collaboration avec les viticulteurs**. Des projets tels que VINTAGE ou vite.net® ont montré que l'amélioration de la convivialité peut **réduire le temps d'interprétation des données jusqu'à 40 %** (CORDIS, 2021).

4. Compatibilité technologique

Un bon DSS doit être **interopérable sur le plan technologique** : compatible avec les capteurs de différents fournisseurs, capable d'exporter des cartes aux formats GIS/VRT et connecté à l'aide de protocoles standard tels que LoRaWAN ou NB-IoT afin de garantir la connectivité même dans les zones rurales (Ojha et al., 2015).

5. Adoption économique à grande échelle

Toutes les exploitations agricoles ne peuvent pas se permettre un investissement technologique élevé en une seule fois. C'est pourquoi les systèmes doivent être **modulaires**, afin de pouvoir commencer avec des composants de base à faible coût (capteurs, composants logiciels) et évoluer progressivement (gestion

de l'irrigation, santé des plantes, récolte). Cette stratégie modulaire a été appliquée avec succès dans des systèmes tels que VineSens, GrapeDSS ou WANUGRAPE4.0.

6. Formation continue

Le succès du DSS dépend du **capital humain**. Il est essentiel d'offrir **une formation pratique et constante**, comprenant des ateliers, un soutien technique et des ressources visuelles pour interpréter les cartes, les courbes de stress ou les alertes phénologiques. Cela garantit une application correcte des recommandations et encourage l'appropriation de la technologie (Bramley, 2009).

7. Impulsion institutionnelle

Enfin, le soutien des politiques publiques et des certifications agit comme **un accélérateur d'adoption**. Les subventions nationales ou européennes, les certifications écologiques et les exigences obligatoires en matière de traçabilité ont fortement encouragé les investissements dans les DSS, car elles permettent de récupérer les coûts, d'accéder à des marchés à plus forte valeur ajoutée et de se conformer aux réglementations environnementales (Wolfert et al., 2017).

6. Défis et opportunités de la numérisation dans la viticulture

6.1 Opportunités technologiques et agronomiques

L'intégration des technologies numériques dans la gestion des vignobles ouvre toute une série d'opportunités pour optimiser la production, accroître la durabilité et améliorer la rentabilité. Ces solutions permettent une intervention plus précise, adaptée aux besoins réels de chaque zone du vignoble, grâce à la collecte et au traitement avancés des données.

Rentabilité basée sur la cartographie aérienne

La mise en œuvre de drones équipés de capteurs multispectraux a prouvé son efficacité pour détecter les zones de plus ou moins grande vigueur au sein d'une même parcelle. Dans des études menées dans des vignobles en Italie, l'utilisation systématique de ces appareils a permis de détecter précocement les problèmes phytosanitaires et de différencier la gestion en fonction du développement végétatif. Cela s'est traduit par une amélioration significative de la rentabilité et une réduction des intrants grâce à des interventions plus localisées (Serena Sofia et al., 2025).

Optimisation de l'utilisation de l'eau

Les technologies de télédétection, associées à des capteurs d'humidité du sol et des plantes, se sont révélées être des outils efficaces pour améliorer le contrôle de l'irrigation. Elles permettent d'adapter l'approvisionnement en eau aux besoins réels du vignoble, en évitant à la fois le stress hydrique et le surarrosage, ce qui a un impact positif sur la qualité des raisins et la durabilité de la culture (Wang et al., 2021). Des économies d'eau sans perte de rendement ont été confirmées dans plusieurs régions viticoles de la Méditerranée, notamment en Castille-La Manche, dans le Languedoc et en Sicile.

Traçabilité numérique et valeur ajoutée

L'un des avantages les plus notables de la numérisation est la possibilité d'enregistrer toutes les opérations effectuées dans le vignoble, de la plantation à la récolte et à la vinification. Cet enregistrement numérique facilite non seulement la gestion interne, mais permet également de démontrer le respect des réglementations environnementales, sanitaires et qualitatives. La traçabilité complète devient ainsi un outil de marketing, car elle offre une transparence au consommateur final et facilite l'obtention de certifications telles que l'agriculture biologique, la production intégrée ou l'appellation d'origine.

Les systèmes qui permettent d'enregistrer numériquement les pratiques agricoles, de surveiller les conditions météorologiques et de documenter les traitements contribuent également à améliorer l'image de durabilité de la cave. Dans un contexte où les consommateurs sont de plus en plus exigeants quant à

l'origine et à l'impact environnemental des produits, cet aspect représente une valeur différentielle stratégique.

6.2 Défis technologiques et opérationnels

Si la transition numérique dans la viticulture offre des possibilités infinies, elle pose également des défis techniques, économiques et sociétaux importants qui doivent être relevés pour garantir son adoption à grande échelle. Cette section identifie les principaux obstacles à la numérisation du vignoble.

Coût initial et de maintenance élevé

L'adoption de technologies avancées telles que les capteurs d'humidité, les stations météorologiques connectées, les drones équipés de caméras multispectrales, les plateformes de gestion des données agricoles (FMIS) et les machines à application variable représente un investissement initial important. Des études menées dans le cadre du projet RDI Precision à Bordeaux (Boraud et al., 2022) indiquent que le coût total d'un système complet de viticulture de précision peut facilement dépasser 100 000 euros, sans compter les coûts liés à la formation technique, à la maintenance, aux licences logicielles ou aux abonnements aux plateformes numériques. Cette barrière économique limite leur accès principalement aux grandes exploitations, aux cooperatives ou exploitations à forte valeur ajoutée, obligeant les petites et moyennes exploitations à opter pour des modèles d'économie collaborative ou des services à la demande (SaaS).

Interopérabilité limitée entre les systèmes

L'un des plus grands défis de l'écosystème numérique agricole est l'interopérabilité entre les différents appareils et plateformes. Souvent, les capteurs de terrain utilisent des protocoles différents (LoRaWAN, NB-IoT, Zigbee), tandis que les tracteurs et les machines fonctionnent avec des interfaces fermées ou des normes propriétaires. Ce manque d'intégration oblige à acheter des développements spécifiques ou des solutions complètes auprès d'un seul fournisseur, ce qui augmente les coûts, génère une dépendance technologique et limite la flexibilité du système (Wolfert et al., 2017). La nécessité d'établir des normes ouvertes et des cadres d'interopérabilité est essentielle pour progresser vers une numérisation efficace et accessible.

Gestion des mégadonnées dans le milieu agricole

La numérisation intensive du vignoble implique la collecte quotidienne de milliers de données provenant de capteurs, d'images satellites, de drones, de stations météorologiques et de plateformes de gestion. Cette accumulation d'informations, si elle n'est pas gérée correctement, peut devenir un problème plutôt qu'une solution. Le défi consiste à garantir un stockage sécurisé dans le cloud, la prise en charge d'API externes, le filtrage des données utiles et la

possibilité de les visualiser en temps réel d'une manière compréhensible pour les techniciens sur le terrain. Cela nécessite non seulement une infrastructure de cloud computing, mais aussi du personnel possédant des compétences avancées en informatique et en science des données (Kamilaris et al., 2017).

Étalonnage local et ajustement saisonnier

Pour que les capteurs et les modèles prédictifs fonctionnent avec précision, il est essentiel d'effectuer des calibrages spécifiques pour chaque parcelle, chaque variété et chaque microclimat. Par exemple, un modèle de prévision du mildiou formé à Bordeaux peut ne pas fonctionner correctement dans le Priorat s'il ne correspond pas à la phénologie locale et aux conditions de la canopée. Ce besoin d'étalonnage et de validation continus nécessite des échantillonnages sur le terrain, des analyses agronomiques, des ajustements de sensibilité et un contrôle qualité des données année après année (Tisseyre et al., 2018).

Problèmes de connectivité dans les zones rurales

Le manque d'infrastructures de télécommunications dans de nombreuses régions rurales reste un obstacle majeur à l'adoption de solutions numériques. Dans certaines régions viticoles d'Espagne, du Portugal ou d'Europe de l'Est, ainsi que dans les pays en développement, l'accès aux réseaux mobiles ou à l'internet haut débit est encore limité. Cela empêche l'utilisation continue de services basés sur le cloud ou l'intégration en temps réel d'appareils IoT, obligeant à installer des solutions locales telles que les réseaux LoRaWAN ou les systèmes de stockage hors ligne (Verdouw et al., 2021).

Confidentialité, gouvernance et propriété des données

À mesure que les vignobles se numérisent, la quantité de données générées se multiplie, soulevant d'importantes questions éthiques et juridiques concernant leur gestion et leur propriété. De nombreux agriculteurs s'inquiètent de l'utilisation non autorisée de leurs données par les fournisseurs de technologies ou les plateformes numériques. L'Union européenne a reconnu ce problème et, dans le cadre de la stratégie européenne en matière de données, a établi que les données agricoles générées sur le terrain appartiennent au producteur, exigeant le respect du règlement général sur la protection des données (RGPD) et promouvant des réglementations spécifiques pour le secteur agroalimentaire (Commission européenne, 2020).

6.3 Défis humains et culturels

La transition vers la viticulture numérique implique non seulement l'adoption de technologies de pointe, mais aussi un changement profond dans la mentalité, la culture organisationnelle et la dynamique sociale du milieu agricole. Les défis humains et culturels sont souvent plus complexes et persistants que les

défis purement techniques, car ils impliquent des valeurs, des croyances et des habitudes enracinées dans des générations de travail dans le vignoble. Les principaux obstacles dans cette dimension critique de la transformation numérique sont examinés ci-dessous.

1. Résistance au changement

La réticence à adopter les nouvelles technologies est l'un des facteurs qui limitent le plus l'expansion de la viticulture de précision. Dans les régions viticoles traditionnelles telles que La Rioja (Espagne), la vallée de la Loire (France) ou la Bourgogne, où les connaissances empiriques et l'observation directe du vignoble ont toujours été à la base des connaissances agronomiques, de nombreux viticulteurs perçoivent les outils numériques comme inutiles, excessivement complexes, voire intrusifs par rapport à leur autonomie professionnelle. Les recherches menées par DataIntelo (2023) et l'université de Montpellier montrent que plus de 45 % des viticulteurs âgés de plus de 55 ans considèrent que la numérisation réduit leur contrôle sur le processus de production et complique les décisions qui étaient auparavant prises « à l'œil nu » ou sur la base de leur expérience directe.

2. Déficit de compétences numériques

L'utilisation efficace des capteurs, des plateformes SIG, des tableaux de bord, des drones et des modèles prédictifs nécessite un nouvel ensemble de compétences qui ne font traditionnellement pas partie du répertoire des opérateurs viticoles. Des concepts tels que le NDVI, l'évapotranspiration, la régression ou l'apprentissage automatique, par exemple, nécessitent des connaissances de base en statistiques, en informatique et en gestion des données. L'existence de ce déficit de compétences a été documentée par la Commission européenne, qui note que plus de 60 % des travailleurs ruraux ne possèdent pas les compétences numériques de base (Commission européenne, 2020). Cela oblige les exploitations agricoles à intégrer de nouveaux profils techniques ou à former leurs travailleurs, ce qui représente un investissement supplémentaire en temps et en ressources. Certaines solutions efficaces ont été la création d'associations ou de coopératives locales qui regroupent des vignobles et financent des formations communes ou l'embauche partagée de personnel technique spécialisé.

3. Transformation de l'organisation agraire

La numérisation modifie radicalement le déroulement des opérations dans une exploitation viticole. Il ne suffit plus d'effectuer les tâches selon le calendrier agricole traditionnel ; il est désormais nécessaire de coordonner les actions sur le terrain en fonction des alertes numériques, de prendre des décisions basées sur des cartes de prescription, d'enregistrer chaque opération sur des plateformes mobiles et d'adapter les protocoles agronomiques à la variabilité intra-parcellaire. Ce changement implique une refonte des routines de travail, une nouvelle répartition des fonctions au sein de l'équipe de travail, ainsi qu'une planification

plus dynamique et plus sensible aux données. Selon des études menées par l'université de Padoue (Zambon et al., 2019), cette transition organisationnelle nécessite un leadership agronomique, une planification participative et surtout l'implication des responsables techniques à toutes les étapes du processus de numérisation.

4. Nécessité d'une collaboration inter institutionnelle

La transformation numérique ne peut se faire seule. L'expérience montre que son adoption est plus efficace lorsqu'elle s'inscrit dans des environnements collaboratifs, tels que les coopératives, les appellations d'origine (AOC), les associations agricoles ou les pôles technologiques. Ces réseaux permettent le partage de capteurs, de connaissances, d'outils et de services techniques, ce qui réduit les coûts et accélère la courbe d'apprentissage. Des projets pilotes collectifs, tels que ceux développés dans le cadre de SmartAgriHubs ou du cluster Vitinnova en Espagne, ont montré que la collaboration facilite l'accès aux technologies émergentes, favorise la confiance entre les acteurs et génère une culture de l'innovation plus ouverte et proactive (Wolfert et al., 2017).

En ce sens, l'existence d'une bonne gouvernance locale qui articule ces collaborations, garantit un accès équitable aux ressources et promeut des activités de formation technique adaptées aux besoins réels des viticulteurs est également essentielle.

6.4 Considérations économiques et modèles d'adoption

Le déploiement des technologies numériques dans la viticulture a des implications financières et stratégiques importantes. Les principales considérations qui influencent son adoption effective sont décrites ci-dessous :

Impact sur le retour sur investissement (ROI)

Des études menées par des économistes agricoles estiment que l'investissement dans les technologies numériques est rentabilisé en seulement **3 à 5 ans**, en particulier dans les exploitations de plus de 20 ha ou les coopératives qui tirent parti des économies d'échelle. Ce retour sur investissement provient de la réduction de la consommation d'eau (20 à 30 %) et de l'utilisation d'intrants chimiques, ainsi que de l'accès à des marchés haut de gamme grâce à la différenciation des produits et à une meilleure perception de la qualité (Serena Sofia et al., 2025 ; Farmonaut, 2024 ; Tey & Brindal, 2012).

Modèles SaaS et de services gérés

Les plateformes agricoles sont de plus en plus proposées sous le **modèle SaaS (Software as a Service)**, qui regroupe des capteurs, une plateforme numérique et une assistance technique dans le cadre d'un abonnement annuel. Cette approche élimine le besoin d'un investissement initial élevé, adapte le coût

au nombre d'hectares ou de points de capteurs et facilite l'adoption progressive de la technologie (Saiwa, 2023 ; Wikipédia, 2024).

Subventions et certifications

Les aides agricoles – telles que celles du programme de développement rural (PDR), des fonds européens ou nationaux – et les certifications de production biologique ou intégrée représentent une incitation économique importante. Une partie du coût de la numérisation peut être couverte par ces aides, ce qui incite les caves à participer à des initiatives collaboratives qui leur apportent également des avantages en termes de réputation et leur donnent accès à des niches de marché spécialisées.

Déploiement progressif de la technologie

Une stratégie efficace pour mettre en œuvre ces solutions consiste à procéder **par étapes** :

- **Phase 1 : Installation d'une station climatique et d'un capteur de sol.**
- **Phase 2 : intégration de drones pour la cartographie aérienne.**
- **Phase 3 : adoption de machines VRT et de systèmes d'irrigation automatisés.**

Cette approche permet d'évaluer les résultats spécifiques à chaque étape, d'ajuster le budget en fonction de l'impact et de réduire les risques financiers, facilitant ainsi l'évolutivité progressive de l'investissement (Kent Downs, 2021).

6.5 Tendances émergentes

Cinq tendances clés dans le développement technologique et agronomique des vignobles numériques ont été identifiées, avec leur potentiel d'intégration dans les systèmes de gestion viticole.

1. Robotisation autonome

Les progrès en matière de robotique autonome pour des tâches spécifiques telles que la taille avancent rapidement. Des plateformes robotiques telles que **Bumblebee**, conçue pour tailler des ceps individuels, et **HyQReal**, un robot quadrupède, ont démontré leur faisabilité technique, atteignant une précision de **87 %** et une durée de taille de **213 secondes par pied de vigne**. Ces chiffres proviennent de travaux présentés dans des référentiels universitaires tels que arXiv et ResearchGate. Le marché mondial de la robotisation dans le domaine de la viticulture a généré **234 millions de dollars en 2024** et devrait atteindre **690 millions de dollars d'ici 2033**, soit un taux de croissance annuel composé (TCAC) de 13 % selon DataIntelo (DataIntelo, 2024).

2. IA explicable et intégrée

Le concept **d'intelligence artificielle explicable (XAI)** gagne du terrain sur des plateformes telles que **AI-GRAPE,** où les modèles non seulement émettent des alertes phytosanitaires cinq jours à l'avance, mais permettent également une validation humaine de ces alertes avant l'application des traitements. Cette interface hybride a démontré qu'elle réduisait l'utilisation de pesticides d'environ **20 %,** en évitant les fausses alertes et en optimisant l'application des intrants (CORDIS, 2023).

3. Blockchain et traçabilité transparente

La technologie blockchain offre l'infrastructure nécessaire pour enregistrer chaque intervention dans le vignoble (irrigation, traitements, dates de récolte, machines utilisées) de manière inaltérable et vérifiable. Ce niveau de traçabilité renforce la crédibilité du produit et soutient les prix sur les marchés haut de gamme, biologiques ou d'appellation d'origine (AOC), en permettant aux producteurs et aux consommateurs de suivre le parcours complet de la vigne à la bouteille (Kamilaris, 2019).

4. Matériel autonome et économe en énergie

La durabilité et l'autonomie des appareils sur le terrain sont essentielles pour un système durable. Les capteurs équipés de **panneaux solaires**, les nœuds LoRa auto-alimentés et les appareils intégrés réduisent considérablement les coûts de maintenance et de recharge. Ces appareils, optimisés pour fonctionner pendant plusieurs années sans intervention, garantissent une collecte continue de données dans des environnements isolés ou peu équipés en infrastructures (Ojha et al., 2015).

5. Normes de données universelles et API ouvertes

Le manque d'interopérabilité reste un obstacle à l'intégration des technologies agricoles. L'adoption de normes émergentes telles que **ISO SmartAgri ou le format de métadonnées** FSIS (Farm Sensor Interoperability Standard) permettra aux capteurs, aux plateformes et aux machines d'échanger des données de manière transparente et évolutive. La mise en place d'API ouvertes facilitera le développement d'une **architecture agricole modulaire**, moins dépendante des fournisseurs et offrant une plus grande flexibilité aux utilisateurs finaux (Wolfert et al., 2017).

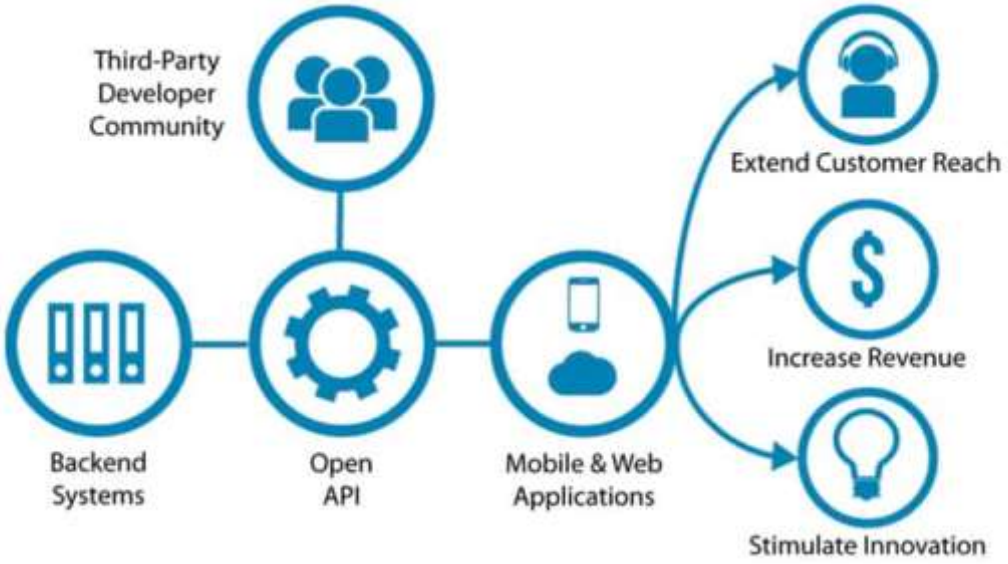

Figure31 . Structure d'une API. *Source : Maplink*

7. Évaluation stratégique de l'adoption des technologies

L'adoption des technologies numériques dans la viticulture va bien au-delà d'une simple mise à niveau instrumentale. Elle a une incidence sur la structure des coûts, l'organisation quotidienne du travail, la gestion des connaissances, la traçabilité et, de plus en plus, sur la manière dont les exploitations agricoles interagissent avec les fournisseurs de technologies et les exigences réglementaires. C'est pourquoi les décisions d'investissement ne doivent pas être motivées uniquement par la disponibilité des outils ou les tendances du marché, mais par une évaluation stratégique qui relie la technologie à un besoin réel, à la capacité de l'exploitation à l'utiliser et au rendement attendu.

Les données institutionnelles et les analyses comparatives s'accordent à dire que les technologies numériques peuvent améliorer la productivité, la durabilité et la résilience, mais leur impact dépend de conditions favorables : connectivité, capital humain, services de conseil technique, accès au financement et interopérabilité entre les solutions (OCDE, 2022 ; Commission européenne, Centre commun de recherche [CCR], 2025). En bref, la technologie ne « fonctionne » pas toute seule : elle crée de la valeur lorsqu'elle est intégrée dans les routines de travail et traduite en décisions agronomiques et commerciales concrètes (OCDE, 2022).

Pour que l'évaluation reste pratique, il est utile de structurer la décision autour de quatre questions directrices. La première concerne **la valeur** : quel avantage spécifique recherche-t-on (efficacité hydrique, qualité, coordination des récoltes, traçabilité, réduction des risques climatiques) ? La deuxième concerne **le coût total** : non seulement le prix d'achat, mais aussi les licences, la maintenance,

les remplacements, la formation et le temps nécessaire à la gestion des données. La troisième concerne **les capacités** : qui utilisera le système, qui interprétera les résultats, qui entretiendra l'équipement et quel soutien externe sera nécessaire. La quatrième porte sur **les risques** : dépendance vis-à-vis des fournisseurs, obsolescence, contraintes de connectivité et gouvernance des données (OCDE, 2022 ; McFadden et al., 2022).

Tableau1. Cadre d'évaluation pratique (les « 4 questions »)

Dimension	Question clé	Ce qui doit être clair avant d'investir
Valeur	Quelle amélioration concrète recherchons-nous ?	Indicateurs opérationnels (par exemple, réduire l'irrigation, homogénéiser la maturation, renforcer la traçabilité)
Coût total	Quel est le coût réel sur 3 à 5 ans ?	Achat + installation + licences + maintenance + remplacements + temps consacré à la gestion des données
Capacités	Qui l'utilise et qui en assure la maintenance ?	Rôles, formation, routines, assistance technique, continuité pendant la haute saison
Risques	Quelles dépendances cela introduit-il ?	Dépendance vis-à-vis d'un fournisseur, interopérabilité, droits sur les données, connectivité, cybersécurité, obsolescence

D’autres questions pourraient être ajoutées telles que :

Les objectifs agronomiques ?

Les objectifs économiques ?

7.1. Avantages et inconvénients des technologies numériques

Chaque innovation crée des opportunités, mais elle introduit également de nouvelles dépendances et une nouvelle complexité. Il est essentiel de comprendre cette dualité pour éviter les investissements motivés par des attentes irréalistes ou des pressions commerciales. Dans l'agriculture, et en particulier dans les cultures à forte valeur ajoutée telles que la vigne, l'avantage le plus constant apparaît lorsque les informations numériques permettent de passer de décisions « moyennes » (« une parcelle, une règle ») à des décisions fondées sur la variabilité réelle : différents sols, microclimats, modèles de vigueur ou état hydrique au sein d'un même bloc (OCDE, 2022 ; JRC, 2025).

L'une des contributions les plus importantes est l'amélioration de la prise de décision et de la gestion des risques. La télédétection (par satellite ou drone) et les cartes de vigueur ou de stress permettent d'identifier l'hétérogénéité au sein d'une parcelle, de suivre son évolution et d'orienter les interventions (irrigation, récolte sélective, hiérarchisation des opérations). En viticulture, la littérature technique confirme que chaque plateforme offre un compromis différent entre la résolution spatiale, la fréquence de revisite et le coût ; le choix de l'option appropriée dépend des objectifs et de la taille de l'exploitation (Matese et al., 2015). Lorsque les données climatiques, pédologiques et phytologiques sont intégrées dans les systèmes d'aide à la décision, les exploitations agricoles peuvent mieux anticiper « quand agir » et « où agir », ce qui réduit l'incertitude opérationnelle. L'OCDE souligne que la valeur de la numérisation augmente lorsque les données se transforment en décisions exploitables, plutôt que de multiplier les indicateurs sans cadre d'interprétation clair (OCDE, 2022).

Un autre avantage courant est l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation des ressources (eau, énergie et intrants), avec une nuance cruciale : les économies ont tendance à apparaître lorsque le suivi est lié à des critères agronomiques et à des protocoles de réponse clairs. Le suivi seul produit rarement des résultats ; ce sont les décisions et les routines qui en produisent (OCDE, 2022). La numérisation renforce également souvent la traçabilité et la conformité en permettant des enregistrements cohérents, des audits plus faciles et des preuves plus solides pour les certifications, ce qui apporte non seulement une valeur agronomique, mais aussi une valeur commerciale et réglementaire (OCDE, 2022).

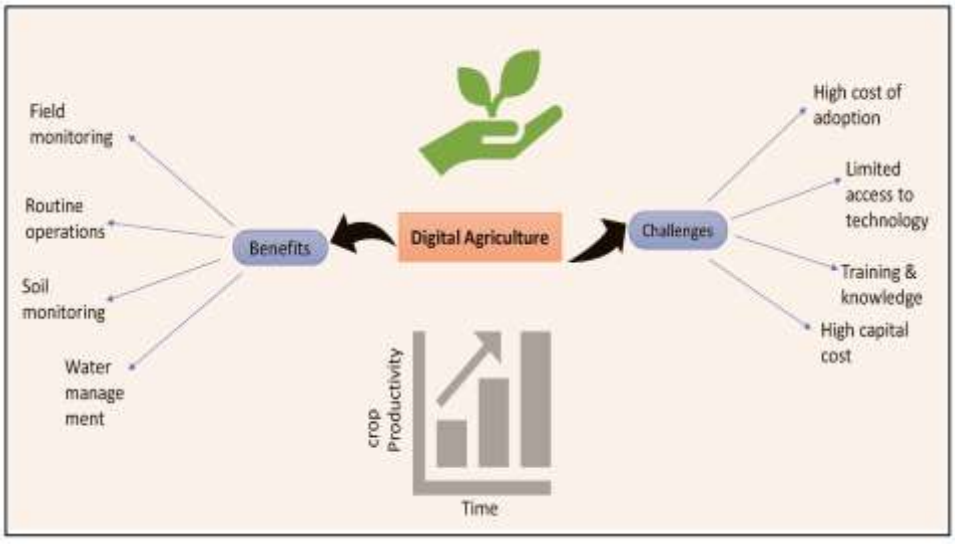

Figure32. Représentation schématique des avantages et des défis de la numérisation dans l'agriculture. Source : Semer un avenir durable : naviguer vers l'horizon numérique de l'agriculture intelligente

En ce qui concerne les limites, les analyses européennes soulignent à plusieurs reprises l'existence d'obstacles structurels : connectivité rurale insuffisante, compétences numériques inégales, coûts initiaux et récurrents, et fragmentation technologique qui rend difficile la combinaison des données entre

les différentes plateformes (JRC, 2025). La gouvernance des données ajoute une autre dimension stratégique : qui est propriétaire des données, comment elles sont utilisées, qu'advient-il des ensembles de données historiques et dans quelles conditions les données sont-elles partagées ou monétisées ? L'OCDE souligne que la confiance dans la numérisation agricole est une condition préalable à son adoption durable, en particulier pour les petites exploitations agricoles qui craignent de perdre le contrôle d'informations stratégiques (McFadden et al., 2022).

Tableau2. Avantages et limites par type de technologie.

Technologie	Avantages les plus fréquents	Limites typiques
Station météorologique / modèles de risque	Anticipation opérationnelle ; meilleure planification	Nécessite des seuils et des routines de réponse ; connectivité requise
Capteurs pour le sol/les plantes	Réglage précis de l'irrigation ; surveillance du stress	Installation et étalonnage ; maintenance ; capacité d'interprétation
Télédétection (satellite/drone)	Cartes de vigueur ; zonage ; récolte sélective	Compromis entre coût/fréquence/résolution ; validation sur le terrain requise
DSS (aide à la décision)	Transforme les données en recommandations ; réduit l'incertitude	Dépend de la qualité des données ; peut donner l'impression d'être une « boîte noire » si elle n'est pas comprise
Journal numérique / traçabilité	Audits plus faciles ; enregistrements ordonnés ; conformité	Nécessite un enregistrement rigoureux et une adaptation régulière

7.2. Coûts de mise en œuvre et de maintenance

Du point de vue du producteur, la question décisive est souvent d'ordre économique : « Est-ce que cela va être rentable pour moi ? » Le débat public tend à mettre l'accent sur les avantages, mais des données comparatives montrent que de nombreux investissements numériques ne donnent pas les résultats escomptés, car les évaluations sous-estiment les coûts récurrents, le temps de gestion et les ajustements organisationnels nécessaires pour rendre les outils opérationnels (OCDE, 2022 ; JRC, 2025). Dans le domaine de la viticulture, où la charge de travail est saisonnière et l'incertitude climatique élevée, cela est particulièrement critique.

Le coût réel d'un système numérique se limite rarement à son prix d'achat. Au-delà de l'acquisition, les exploitations agricoles doivent supporter les frais d'installation, d'étalonnage, de connectivité, de formation, de maintenance, de remplacement des composants, d'abonnements/licences, ainsi que le temps nécessaire à la collecte, à la validation et à l'interprétation des données. Ensemble, ces éléments constituent le coût total de possession (TCO), essentiel pour évaluer la rentabilité sur un horizon réaliste de 3 à 5 ans (OCDE, 2022). L' écosystème numérique évolue également rapidement : les mises à jour, les changements de logiciels, les nouvelles exigences en matière de cybersécurité et les problèmes de compatibilité peuvent augmenter les coûts et réduire la prévisibilité (McFadden et al., 2022).

Les coûts organisationnels sont souvent sous-estimés. Si l'exploitation agricole ne redéfinit pas qui vérifie les données, qui prend les décisions, quand agir et comment l'outil s'intègre dans les routines quotidiennes, la technologie risque d'être sous-utilisée. Dans la pratique, une partie des coûts correspond à des « coûts d'apprentissage » : le temps investi pour maîtriser l'outil, développer des protocoles, calibrer les seuils et valider les résultats par rapport à la réalité sur le terrain.

Tableau3. Structure du coût total de possession (TCO) des solutions numériques agricoles.

Bloc de coûts	**Ce qu'il comprend**	**Où il est souvent sous-estimé**
Investissement initial	Appareils, installation, étalonnage	« Je ne regarde que le prix du capteur/de la plateforme »
Fonctionnement	Abonnements, données mobiles, énergie, consommables	Petits frais récurrents qui s'accumulent
Maintenance	Contrôles, remplacements, réparations	Dépendance vis-à-vis des fournisseurs et coûts liés aux temps d'arrêt
Intégration	Connexion des systèmes, exportations, pipelines de données	Interopérabilité entre les marques/plateformes
Formation	Mise à jour initiale et continue des compétences	Le personnel apprend « pendant la saison », sous pression
Temps consacré à la gestion des données	Examen des alertes, validation des données, enregistrement	Manque de temps pendant les périodes de pointe

7.3 Éléments à évaluer avant d'investir dans les technologies numériques

Une décision d'investissement judicieuse commence souvent par une question simple : quel problème spécifique est-ce que j'essaie de résoudre ? Les données internationales montrent systématiquement que les mises en œuvre réussies partent d'un diagnostic de la production et de l'organisation plutôt que d'un outil ; lorsque la technologie est achetée sans objectif opérationnel clair, elle est plus susceptible d'être abandonnée (OCDE, 2022 ; JRC, 2025).

En viticulture, les objectifs se regroupent généralement en quatre catégories. Premièrement, les objectifs d'efficacité (eau, énergie, intrants). Deuxièmement, les objectifs de qualité (zonage, récolte sélective, uniformité de maturation). Troisièmement, les objectifs de conformité et de traçabilité. Quatrièmement, les objectifs de gestion des risques (climat, maladies, incertitude opérationnelle). Il est important de clarifier quel objectif est prioritaire, car chacun d'entre eux nécessite des technologies et des niveaux de complexité différents. Une station météorologique et des alertes peuvent être décisives pour la gestion des risques liés aux maladies ( ) ; les réseaux de capteurs et la cartographie peuvent être plus justifiés dans le cadre de stratégies haut de gamme ; et un journal de bord numérique peut alléger considérablement la charge liée à la conformité.

Une fois l'objectif défini, un deuxième critère est la variabilité réelle du vignoble. L'agriculture de précision tend à générer plus de valeur lorsque l'hétérogénéité au sein d'un bloc est significative ; dans les vignobles très uniformes, d'autres motivations (conformité, coordination logistique, simplification administrative) peuvent dominer l'analyse de rentabilité (OCDE, 2022). Le troisième critère est humain : les compétences et le temps disponibles. L'UE souligne que la formation continue et les services de conseil sont essentiels pour soutenir la numérisation ; sans soutien, même des solutions bien choisies peuvent échouer car elles ne font jamais partie du travail quotidien (Réseau PAC de l'UE, 2024).

Tableau4. Matrice de proportionnalité : « besoin-capacité-solution »

Profil de l'exploitation	Besoin principal	Capacité interne	Approche numérique proportionnelle
Petite/familiale	Alertes et planification ; simplification des dossiers	Limitée	Solutions de base + services externes ciblés
Moyen, axé sur la qualité	Zonage, récolte sélective, traçabilité	Modéré	Capteurs/télédétection + DSS avec assistance technique
Coopérative / nombreux producteurs	Coordination, uniformité, traçabilité	Variable	Plateformes partagées + formation + protocoles communs
À grande échelle/intensif	Optimisation à grande échelle et logistique	Élevée	Intégration des données + automatisation progressive

7.4 Modèles d'adoption progressive des technologies numériques

La transformation numérique se fait rarement d'un seul coup. Les données comparatives montrent que les processus les plus solides progressent graduellement, en accumulant de l'expérience, en renforçant la confiance interne et en évaluant les résultats avant de passer à l'échelle supérieure (OCDE, 2022). Cette approche est particulièrement pertinente dans le domaine de la viticulture, où l'incertitude climatique et la variabilité des revenus rendent rationnelle la minimisation des risques.

Dans la pratique, de nombreux vignobles commencent par une « couche de base » de numérisation : tenue de registres, informations météorologiques et alertes. Ils ajoutent ensuite la surveillance (capteurs, cartes) et passent enfin à des systèmes intégrés (DSS, automatisation partielle). L'adoption par couches favorise le développement des capacités parallèlement à une complexité croissante. En outre, les modèles basés sur les services (vols de drones ou analyses payants à l'utilisation) et les modèles coopératifs (infrastructures et capacités de conseil partagées) peuvent réduire les obstacles économiques et accélérer l'apprentissage collectif, conformément à l'importance accordée par l'Europe à la formation et aux réseaux d'innovation agricole (EU CAP Network, 2024).

Tableau5. Voies d'adoption progressive et moments où elles ont tendance à fonctionner le mieux

Voie	Description	Quand elle est la plus appropriée
Essai pilote limité	Essai dans un seul bloc/une seule saison	Lorsque le retour sur investissement ou la facilité d'utilisation sont incertains
Services externes	Paiement à l'utilisation (drone, analyse, conseil)	Petites/moyennes exploitations agricoles avec une faible fréquence d'utilisation
Coopérative/partagé	Infrastructure et assistance partagées	Régions comptant de nombreux producteurs et des ressources individuelles limitées
Adoption par étapes	Basique → intégré sur 2 à 4 ans	Lorsque la durabilité à long terme et l'apprentissage sont des priorités

ANNEXE I – Questions de révision

Bloc 1 : Introduction à la viticulture de précision

1. Expliquez avec vos propres mots ce que signifie « variabilité intra-parcelle » et pourquoi l'ignorer conduit à une gestion inefficace et moins durable.

2. Comparez deux avantages environnementaux et deux avantages productifs de la gestion des zones de gestion spécifiques (SEZ).

3. Décrivez un processus minimal (en 5 étapes) pour passer de l'observation du vignoble à une décision d'irrigation sectorisée.

4. Choisissez un facteur (sol, climat, pente ou exposition au soleil) et expliquez comment il peut affecter de différentes manières la vigueur, le rendement et la qualité au sein d'une même parcelle.

5. Cas court : un domaine viticole fait état d'économies d'eau de 30 à 40 % après avoir sectorisé l'irrigation. Quelles données seraient essentielles pour justifier ce résultat et éviter les biais ?

Bloc 2 : Visualisation des données et modélisation prédictive pour la gestion du vignoble

6. Distinguez les « données », les « informations » et les « connaissances » à l'aide d'un exemple de NDVI, d'humidité du sol et de décision de récolte.

7. Expliquez les avantages et les limites de l'utilisation des réseaux neuronaux pour prédire les performances par rapport à des méthodes plus simples (par exemple, la régression linéaire).

8. Que signifient « validation » et « généralisation » d'un modèle en viticulture ? Proposez un protocole de validation croisée de base entre les campagnes.

9. Donnez un exemple où une visualisation « trompeusement claire » conduit à une mauvaise décision. Comment l'éviteriez-vous ?

Bloc 3 : Technologies de surveillance intelligentes dans le vignoble

10. Comparez les capteurs de sol et les capteurs foliaires/de sève : ce qu'ils mesurent, quand les utiliser et comment ils se complètent.

11. Expliquez comment un réseau WSN (LoRaWAN/Zigbee) bien conçu permet d'anticiper le gel ou le stress hydrique.

12. Différenciez l'utilisation des satellites (couverture, fréquence) et des drones (résolution, ponctualité) pour la gestion intra-parcelle.

13. Quelles erreurs d'interopérabilité apparaissent généralement entre le SIG ↔ les machines ? Proposer des solutions.

14. Comparer l'impact environnemental attendu de la VRT par rapport à une gestion uniforme de l'eau, de l'azote et des fongicides.

Bloc 4 : Systèmes d'aide à la décision (DSS)

15. Décrivez le pipeline d'un DSS viticole, de la capture à l'action (6 étapes).

16. Développez un cas d'utilisation où le DSS recommande l'irrigation dans ZME-3 : quels sont les intrants qui l'activent et quelles sont les conditions qui l'inhibent ?

17. Comment introduiriez-vous l'apprentissage continu dans le DSS après chaque campagne ? Indiquez au moins 3 paramètres que vous ajusteriez.

18. Concevez un écran mobile pour les opérateurs sur le terrain : ce qu'il faut voir, quelles notifications, quelles actions rapides.

Bloc 5 : Défis, personnes et modèles d'adoption

19. Identifiez trois obstacles humains/culturels à la numérisation et comment les surmonter grâce à la formation et au leadership.

20. Comparez l'achat d'équipement et les services SaaS/gérés : risques, coûts récurrents et flexibilité.

21. Comment hiérarchiseriez-vous les investissements entre les stations météorologiques, les capteurs de sol, les drones et la VRT dans une exploitation agricole disposant d'un budget limité ?

22. Présentez un cas d'économie collaborative (partage de drones/analyses dans une coopérative ou une coopérative de développement) : règles et avantages.

ANNEXE II – Activité didactique : « Choisir les technologies adaptées à deux caves viticoles confrontées à des problèmes similaires »

L'objectif de cette activité est de vous aider à réfléchir de manière stratégique à l'adoption des technologies numériques dans la viticulture.
Vous analyserez deux domaines viticoles qui font face à des défis agronomiques similaires, mais qui diffèrent considérablement en termes de taille, de capacité financière et de ressources internes.

Votre tâche consiste à proposer des solutions technologiques réalistes et proportionnées pour chaque exploitation.

Les deux domaines viticoles sont confrontés aux problèmes récurrents suivants :

- Vigueur inégale des vignes au sein du vignoble.
- Stress hydrique pendant les vagues de chaleur estivales.
- Épidémies (en particulier l'oïdium) après des nuits humides.
- Maturation inégale, compliquant la logistique de la récolte.
- Pression pour réduire les intrants (eau, azote, fongicides) sans réduire le rendement ou la qualité.

La différence entre les deux cas n'est pas le problème, c'est leur capacité à investir et à gérer la technologie.

Cave A – Grande et financièrement solide

- 220 hectares répartis sur plusieurs sites.
- Équipe technique et responsable du vignoble à temps plein.
- Accès à une assistance informatique (interne ou externalisée).
- Capacité financière élevée.
- Principal défi : coordination et cohérence entre les nombreuses parcelles.

Cave B – Petite et ressources limitées

- 18 hectares, principalement contigus.
- Exploitation par le propriétaire, avec 1 à 2 travailleurs saisonniers.
- Temps administratif limité.
- Capacité financière limitée.

- Principal défi : gestion du temps et outils simples d'aide à la décision.

Vous pouvez choisir parmi les technologies suivantes :

1. Carnet de terrain numérique / application de traçabilité
2. Station météo avec alertes mobiles
3. Cartes de vigueur par satellite (service de surveillance de base)
4. Service de surveillance par drone (vols externalisés)
5. Sondes d'humidité du sol
6. Aide à la planification de l'irrigation (application ou conseil)
7. Système d'aide à la décision (DSS) pour l'irrigation ou les maladies
8. Équipement d'application à débit variable
9. Outil de communication et de planification pour les équipes
10. Contrat de conseil agronomique externe

Vous n'êtes pas tenu d'utiliser des calculs techniques.
Concentrez-vous sur la réflexion stratégique, la proportionnalité et la faisabilité.

Tâches

1. Sélection des technologies (tâche principale)

Pour chaque domaine viticole :

- Sélectionnez trois technologies à mettre en œuvre au cours de la première année.
- Justifiez clairement votre sélection.

Votre justification doit expliquer :

- Pourquoi cette technologie est adaptée à la taille et à la capacité économique de la cave.
- Comment elle répond aux problèmes agronomiques communs.
- Pourquoi il est réaliste de la mettre en œuvre au cours d'une seule saison de croissance.
- Pourquoi vous n'avez pas choisi des alternatives plus complexes ou plus coûteuses.

2. Définissez quatre indicateurs clés de performance pour chaque exploitation viticole

Pour chaque domaine viticole, définissez quatre indicateurs clés de performance (KPI) pouvant être mesurés à la fin de la saison.

Les KPI doivent être les suivants :

- Simples
- Mesurables
- Réalistes pour une année

Exemples (vous pouvez les adapter ou créer les vôtres) :

- Réduction en % de la consommation d'eau d'irrigation
- Réduction du nombre d'applications uniformes de fongicides
- Amélioration de l'uniformité de maturation
- Moins d'interventions tardives contre les maladies
- Réduction du temps consacré aux tâches administratives
- Amélioration de la coordination des récoltes

Expliquez brièvement pourquoi chaque indicateur clé de performance est pertinent.

3. Décrivez un processus « Données → Décision → Action ».

Pour chaque domaine viticole, décrivez en quelques mots :

- Un processus de décision en matière d'irrigation
- Un processus décisionnel en matière de gestion des maladies

Expliquez :

- Quelles informations sont collectées
- Qui l'examine
- Comment la décision finale est-elle prise ?
- Quelles mesures sont prises sur le terrain

Aucun schéma technique n'est requis. Une explication claire suffit.

4. Identification et atténuation des risques

Pour chaque domaine viticole :

- Identifiez deux risques réalistes liés à l'adoption de la technologie.
- Proposer une mesure d'atténuation par risque.

Exemples de risques :

- Surcharge du personnel
- Coûts d'abonnement
- Manque de compétences numériques
- Dépendance excessive à l'égard d'un fournisseur
- Technologie non utilisée de manière cohérente

5. Plan de communication

Expliquez comment les résultats seront communiqués :

- À la direction (perspective économique et stratégique)
- À l'équipe du vignoble (perspective opérationnelle)

Soyez précis et concret.

Références

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Évapotranspiration des cultures : lignes directrices pour le calcul des besoins en eau des cultures*. Document 56 de la FAO sur l'irrigation et le drainage.

- Ammoniaci, M., Kartsiotis, S.-P., Perria, R., & Storchi, P. (2021). État de l'art des technologies de surveillance et du traitement des données pour la viticulture de précision. *Agriculture, 11*(3), 201. https://doi.org/10.3390/agriculture11030201

- Aqeel-your-Rehman, Abbasi, A. Z., Islam, N., & Shaikh, Z. A. (2014). Une revue des applications des capteurs et réseaux sans fil dans l'agriculture. *Computer Standards & Interfaces, 36*(2), 263–270. https://doi.org/10.1016/j.csi.2011.03.001

- Ayaz, M., Shehzad, N., Ahmad, I., & Sharif, K. (2019). Détection automatisée des maladies des plantes à l'aide de l'apprentissage automatique. *Big Data and Cognitive Computing, 3*(2), 26. https://doi.org/10.3390/bdcc3020026

- Basile, K., et al. (2023). Modèles phénologiques d'apprentissage profond pour la surveillance des vignes par satellite. *Ives OpenScience*.

- Bindi, M., & Olesen, J. E. (2011). Les réponses de l'agriculture européenne au changement climatique. *Changement environnemental régional, 11*(1), S151–S158. https://doi.org/10.1007/s10113-010-0173-x

- Bongiovanni, R., & Lowenberg-DeBoer, J. (2004). Agriculture de précision et durabilité. *Precision Agriculture, 5*(4), 359–387. https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa

- Bramley, R. G. V. (2009). Leçons tirées de près de 20 ans de recherche sur la viticulture de précision en Australie. *Australian Journal of Grape and Wine Research, 15*(1), 131–139. https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2009.00049.x

- Bramley, R. G. V., & Hamilton, R. P. (2007). Comprendre la variabilité des systèmes de production de raisins de cuve. *Australian Journal of Grape and Wine Research, 13*(1), 32–45. https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2006.tb00039.x

- Broome, J. C., English, J. T., & Marois, J. J. (1995). Développement d'un modèle d'infection pour la pourriture grise des grappes de raisin basé sur la température et la durée d'humidité. *Phytopathology, 85*(1), 97–102. https://doi.org/10.1094/Phyto-85-97

- Burrell, J., Brooke, T., & Beckwith, R. (2004). Informatique viticole : réseaux de capteurs dans la production agricole. *IEEE Pervasive Computing, 3*(1), 38–45. https://doi.org/10.1109/MPRV.2004.1269130

- Calonnec, A., Cartolaro, P., & Dubourdieu, D. (2008). Modélisation du développement des maladies et évaluation de l'impact des stratégies de lutte contre l'oïdium de la vigne. *Plant Pathology, 57*(3), 493–508.

- Carmona, J. A., Tardaguila, J., & Diago, M. P. (2021). Prédiction du rendement et de la qualité des raisins à l'aide de l'apprentissage automatique et de l'imagerie par drone. *Computers and Electronics in Agriculture, 187*, 106269. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106269

- Castro, F., Sosa, A., & Carballo, J. (2021). Fertilisation à taux variable en viticulture à l'aide d'une cartographie de l'azote par drone : une étude de cas à Mendoza, en Argentine. *Agriculture de précision, 22*(4), 973-990. https://doi.org/10.1007/s11119-020-09750-1

- Chuine, I., Bonhomme, M., Legave, J. M., García de Cortázar-Atauri, I., Charrier, G., & Lacointe, A. (2013). Les modèles phénologiques peuvent-ils prédire avec précision la phénologie des arbres à l'avenir ? L'obstacle méconnu de la rupture de l'endodormancy. *Global Change Biology, 22*(10), 3444–3460.

- CORDIS. (2020). VINTAGE – Résumé du projet de viticulture de précision. *Résultats de la recherche de l'UE*. https://cordis.europa.eu/project/id/226783

- CORDIS. (2023). AI-GRAPE : Surveillance de la santé des vignes grâce à l'intelligence artificielle. *Base de données des projets H2020 de l'UE*. https://cordis.europa.eu/project/id/101060840

- Delmotte, F., Corio-Costet, M. F., & Delière, L. (2020). Gestion intégrée des maladies et réduction de l'utilisation des pesticides en viticulture : évaluation des systèmes d'aide à la décision. *Science of the Total Environment, 731*, 139269. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139269

- Di Gennaro, S. F., Matese, A., & Vaccari, F. P. (2020). Techniques avancées de télédétection et de visualisation dans la viticulture de précision. *Agronomie, 10*(7), 967. https://doi.org/10.3390/agronomy10070967

- Elsherbiny, O. ; Elaraby, A. ; Alahmadi, M. ; Hamdan, M. ; Gao, J. : « Diagnostic rapide de la santé des vignes à partir de l'imagerie numérique et de l'apprentissage profond », Plants (Bâle) ; 2024, 13 (1) : 135. doi: 10.3390/plants13010135

- Fernandes, J. P., Silva, L., Gomes, M., & Oliveira, T. (2022). Prévision des rendements en viticulture à l'aide des séries chronologiques Sentinel-2 et des réseaux neuronaux LSTM : une étude de cas dans la région viticole du Haut-Douro. *Télédétection, 14*(18), 4591. https://doi.org/10.3390/rs14184591
- Finger, R., Swinton, S. M., El Benni, N., & Walter, A. (2019). L'agriculture de précision au carrefour de la production agricole et de l'environnement. *Revue annuelle de l'économie des ressources, 11*, 313–335. https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-093929

- García, M., Hernández, L., & Santesteban, L. G. (2022). Les jumeaux numériques en viticulture : intégration de données en temps réel pour une modélisation dynamique. *Agronomy, 12*(4),856.

- Gubler, W. D., Rademacher, M. R., & Vasquez, S. J. (1999). Lutte contre l'oïdium à l'aide de l'indice de risque d'oïdium de l'université de Californie à Davis. *California Agriculture, 53*(1), 14–19. https://doi.org/10.3733/ca.v053n01p14

- Huang, Y., Wang, H., & Fuentes, S. (2022). Identification basée sur l'apprentissage profond des maladies foliaires dans les vignobles à l'aide de l'imagerie multispectrale par drone. *Remote Sensing, 14*(12), 2803. https://doi.org/10.3390/rs14122803

- Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2019). La blockchain dans l'agriculture : une revue systématique. *Agronomie, 9*(10), 18. https://doi.org/10.3390/agronomy9100661

- Kerkech, M., Hafiane, A., & Canals, R. (2020). Approche d'apprentissage profond avec espaces colorimétriques et indices de végétation pour la détection des maladies dans les vignes. *Computers and Electronics in Agriculture, 175*, 105528. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105528

- Martínez-Casasnovas, J. A., Escolà, A., & Ramos, M. C. (2012). Zones de gestion spécifiques au site dans la viticulture de précision : une revue. *Agriculture de précision, 13*(5), 622–638. https://doi.org/10.1007/s11119-012-9272-6

- Matese, A., & Di Gennaro, n.d. (2015). La technologie dans la viticulture de précision : une revue de l'état de l'art. *International Journal of Wine Research, 7*, 69–81. https://doi.org/10.2147/IJWR.S69405

- Ojha, T., Misra, S., & Raghuwanshi, N. S. (2015). Réseaux de capteurs sans fil pour l'agriculture : état des lieux et défis futurs. *Computers and Electronics in Agriculture, 118*, 66–84. https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.011

- Rossi, V., Caffi, T., & Salinari, F. (2012). Aider les agriculteurs à faire face à la complexité croissante de la prise de décision en matière de protection des cultures. Phytopathologia Mediterranea, 51, 457–479. https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-11038

- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Surveillance des systèmes végétaux dans les Grandes Plaines à l'aide de l'ERTS. *Publication spéciale de la NASA, 351*, 309.

- Santesteban, L. G., et al. (2017). Variabilité des vignobles et viticulture numérique : situation actuelle et perspectives d'avenir. *Frontiers in Plant Science, 8*, 660. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00660

- Tisseyre, B., Ojeda, H., & Taylor, J. A. (2011). Nouvelles technologies et méthodologies pour la viticulture adaptée au terroir. *OENO One, 45*(3), 123–134. https://doi.org/10.20870/oeno-one.2011.45.3.1507

- Ünal, Z. (2020). L'agriculture intelligente devient encore plus intelligente grâce au deep learning — Une analyse bibliographique. *IEEE Access, 8,* 105587–105609. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3000175

- Verdouw, C. N., Tekinerdogan, B., Beulens, A. J. M., & Wolfert, J. (2021). Les jumeaux numériques dans l'agriculture intelligente. *Agricultural Systems, 189*, 103046. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103046

- VineSens. (2020). Système intelligent de surveillance des vignobles. https://www.vine-sens.com

- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Le Big Data dans l'agriculture intelligente – Une revue. *Agricultural Systems, 153*, 69–80. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023