CHAPITRE 1 :

FONDEMENTS DE LA VARIABILITÉ ET LOGIQUE DE DÉCISION EN AGRICULTURE DE PRÉCISION

Présentation générale du chapitre 1

L'agriculture de précision constitue une approche de gestion agronomique qui consiste à adapter les interventions agricoles aux différences observées au sein d'une parcelle et au cours du temps. Elle s'appuie sur l'acquisition, l'analyse et l'interprétation de données afin d'améliorer les décisions relatives à la fertilisation, à l'irrigation, au semis et à la protection des cultures.

Contrairement à une conduite uniforme, dans laquelle la même dose d'intrant est appliquée sur toute la parcelle, l'agriculture de précision cherche à déterminer où, quand et dans quelle mesure une intervention doit être adaptée.

Toutefois, l'utilisation de technologies modernes ne garantit pas automatiquement une meilleure performance agronomique. Une carte, un capteur ou un drone ne fournit pas, à lui seul, une décision correcte. L'efficacité de l'agriculture de précision dépend avant tout de la capacité à identifier les causes de l'hétérogénéité, à vérifier la qualité des données et à choisir une intervention adaptée au facteur limitant.

Ce chapitre développe donc les fondements du raisonnement agronomique en agriculture de précision, avant l'étude détaillée des technologies de géolocalisation, de télédétection, des capteurs et des systèmes d'aide à la décision dans les chapitres suivants.

Organisation pédagogique

Partie	Contenu
1	Introduction, définitions et principes
2	Sources de variabilité spatiale et temporelle

3	Variabilité contrôlable et choix de l'intervention
4	Cycle de décision et qualité des données
5	Calcul et interprétation de la modulation

Objectifs pédagogiques

À la fin de ce chapitre, l'étudiant devra être capable de :

1. Définir l'agriculture de précision et expliquer ses principes fondamentaux.
2. Distinguer la variabilité spatiale de la variabilité temporelle.
3. Identifier les principales sources d'hétérogénéité d'une parcelle agricole.
4. Différencier une variabilité agronomique réelle d'une erreur de mesure.
5. Évaluer le caractère contrôlable ou partiellement contrôlable d'un facteur de variabilité.
6. Justifier le choix d'une intervention en fonction de la cause identifiée.
7. Décrire les cinq étapes du cycle de décision en agriculture de précision.
8. Calculer une quantité totale d'intrant à partir de doses variables selon les zones.
9. Interpréter les conséquences agronomiques, économiques et environnementales d'une modulation.

Prérequis :

Notions de pédologie, de nutrition végétale, de conduite des cultures, de calcul de surfaces et de proportions, ainsi que lecture de tableaux de données.

1.1. Introduction à l'agriculture de précision

1.1.1. Définition

L'agriculture de précision peut être définie comme une démarche de gestion des systèmes de production agricole qui prend en compte la variabilité spatiale et temporelle des caractéristiques du sol, des cultures et de leur environnement, afin d'adapter les interventions aux besoins réels ou estimés de chaque zone.

Elle repose sur l'association de trois dimensions :

- ***La dimension agronomique :*** comprendre le fonctionnement du sol, des plantes et du système de production.
- ***La dimension technologique :*** acquérir, géolocaliser, analyser et cartographier les données.
- ***La dimension décisionnelle :*** transformer les informations obtenues en interventions justifiées et évaluables.

L'agriculture de précision ne doit donc pas être réduite à l'utilisation du GPS, des drones ou des logiciels cartographiques. Ces outils ne prennent leur valeur que lorsqu'ils contribuent à résoudre un problème agronomique clairement identifié.

1.1.2. Pourquoi développer l'agriculture de précision ?

Dans une parcelle cultivée, les conditions de croissance ne sont pas nécessairement identiques partout. Deux zones voisines peuvent présenter des différences de texture, de profondeur du sol, de teneur en matière organique, d'humidité ou de disponibilité des éléments nutritifs.

Ces différences peuvent entraîner des variations de croissance, de consommation d'eau, de sensibilité aux maladies et de rendement.

Prenons l'exemple d'une parcelle de blé dur dans une région semi-aride algérienne. Une zone située sur un sol profond et relativement argileux peut conserver davantage d'eau qu'une zone sableuse et superficielle. Pendant une période sèche, la première zone peut maintenir une croissance plus importante, alors que la seconde présente un stress hydrique précoce.

Si l'agriculteur applique davantage d'azote sur la zone la moins productive sans vérifier l'origine de cette différence, il risque d'augmenter les dépenses sans améliorer significativement le rendement. Le facteur limitant peut être l'eau disponible plutôt que l'azote.

L'agriculture de précision vise précisément à éviter ce type d'erreur : diagnostiquer la cause avant de choisir l'intervention.

1.1.3. De l'agriculture uniforme à l'agriculture de précision

Agriculture à gestion uniforme



Une même dose d'engrais ou une même quantité d'eau est appliquée sur toute la parcelle, indépendamment des différences locales.

Agriculture de précision



La parcelle est caractérisée en plusieurs zones et les interventions sont adaptées lorsque les données et le diagnostic agronomique le justifient.

La gestion uniforme peut être parfaitement adaptée lorsque la parcelle est suffisamment homogène ou lorsque le coût de la différenciation dépasse son bénéfice potentiel. L'agriculture

de précision ne consiste donc pas à moduler systématiquement toutes les interventions, mais à déterminer quand la différenciation est utile.

1.1.4. Les principes fondamentaux

L'agriculture de précision repose sur les principes suivants :



Figure : Illustration de l'hétérogénéité spatiale des propriétés du sol et du rendement

au sein d'une parcelle agricole.

1.2. Les sources de variabilité spatiale et temporelle

1.2.1. Notion de variabilité

La variabilité désigne les différences observées entre plusieurs points, zones ou périodes pour une caractéristique donnée.

En agriculture, elle peut concerner les propriétés du sol, la disponibilité de l'eau, le développement de la végétation, la pression des bioagresseurs ou le rendement.

On distingue principalement deux formes de variabilité.

A. Variabilité spatiale

La variabilité spatiale correspond aux différences entre les endroits d'une même parcelle, à un moment donné ou sur une période définie.

Exemples :

- Une teneur en matière organique plus élevée dans une partie du champ.
- Une profondeur de sol plus faible sur une zone de pente.
- Une humidité du sol plus importante dans une zone basse.
- Un rendement plus faible sur une bande compactée.

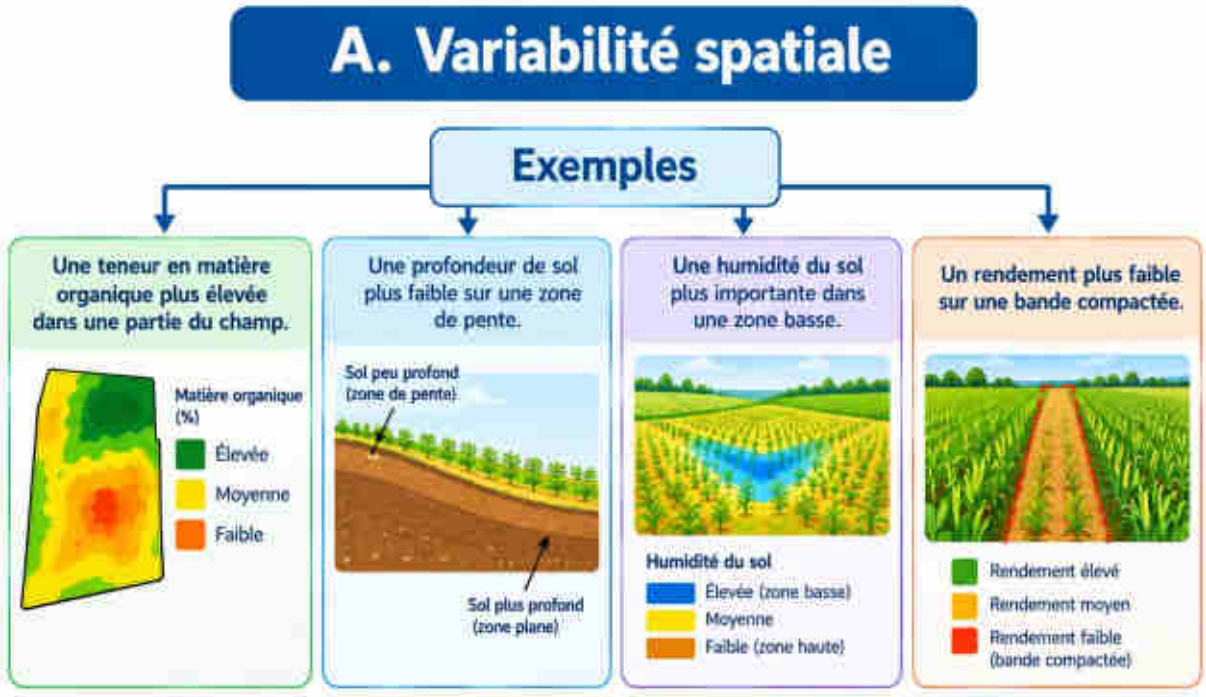


Figure 1 : Exemples de variabilité spatiale des caractéristiques du sol et du rendement au sein d'une parcelle agricole.

B. Variabilité temporelle

La variabilité temporelle correspond aux changements d'une caractéristique au cours du temps, au même endroit ou dans la même zone.

Exemples :

- Une diminution de l'humidité du sol entre deux irrigations.
- Une évolution de la vigueur du blé entre le tallage et la montaison.
- Une augmentation de la pression d'une maladie au cours du cycle cultural.
- Des différences de rendement entre deux années soumises à des conditions climatiques différentes.

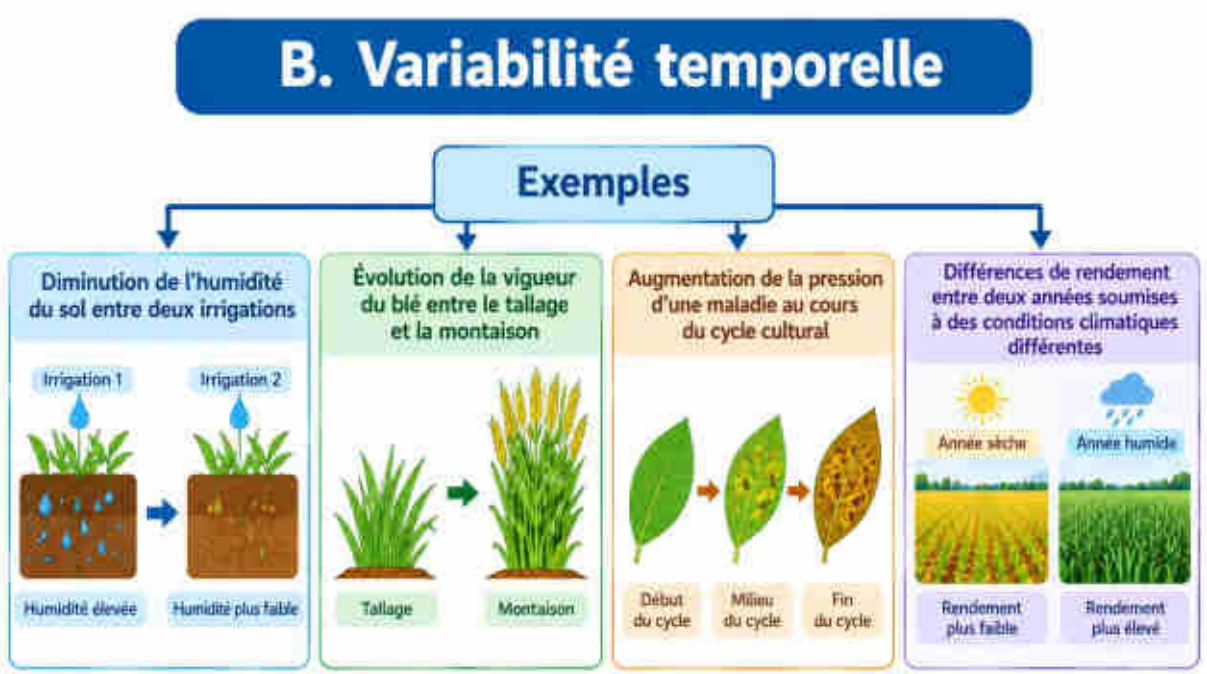


Figure 2 : Exemples de variabilité temporelle de l'humidité du sol, du développement du blé, de la pression des maladies et du rendement agricole.

Les deux formes sont souvent liées. Une zone qui retient peu d'eau peut être particulièrement pénalisée pendant une année sèche, mais présenter un rendement relativement proche du reste de la parcelle pendant une année humide.

Conséquence pédagogique : une carte représente une situation à une date donnée ou sur une période précise. Elle ne doit pas être considérée automatiquement comme une description permanente de la parcelle.

1.2.2. Principales sources de variabilité

Le tableau suivant synthétise les facteurs à examiner lors du diagnostic d'une parcelle.

Origine	Facteurs concernés	Conséquences possibles
Propriétés du sol	Texture, profondeur, structure	Réserve utile, enracinement, disponibilité de l'eau
Fertilité chimique	pH, matière organique, éléments nutritifs	Nutrition et croissance des cultures
Topographie	Altitude, pente, position dans le relief	Ruissellement, drainage, redistribution de l'eau
Gestion antérieure	Précédent cultural, apports organiques, passages d'engins	Reliquats nutritifs, compaction, hétérogénéité
Peuplement végétal	Densité, levée, développement	Compétition entre plantes et potentiel de rendement
Bioagresseurs	Adventices, maladies, ravageurs	Pertes de croissance ou de rendement localisées
Climat	Pluie, température, sécheresse, gel, grêle	Stress et fluctuations de production
Mesure et traitement des données	Erreur GPS, capteur mal calibré, données manquantes	Hétérogénéité apparente ou diagnostic erroné

Les échelles spatiales indiquées par les cartes ou les mesures dépendent de la parcelle, de la méthode d'échantillonnage et du phénomène étudié. Il ne faut pas attribuer une échelle universelle à chaque facteur.

A. Les facteurs pédologiques

Les propriétés du sol jouent un rôle majeur dans le fonctionnement des cultures.

- Texture : les proportions de sable, de limon et d'argile influencent la rétention en eau, le drainage et certaines propriétés chimiques.
- Profondeur : un sol peu profond limite le volume exploré par les racines.
- Matière organique : elle participe à la structure du sol, à sa fertilité et à la rétention en eau.
- pH : il influence la disponibilité de nombreux éléments nutritifs.
- Compaction : elle peut limiter l'enracinement, l'infiltration et la circulation de l'air.

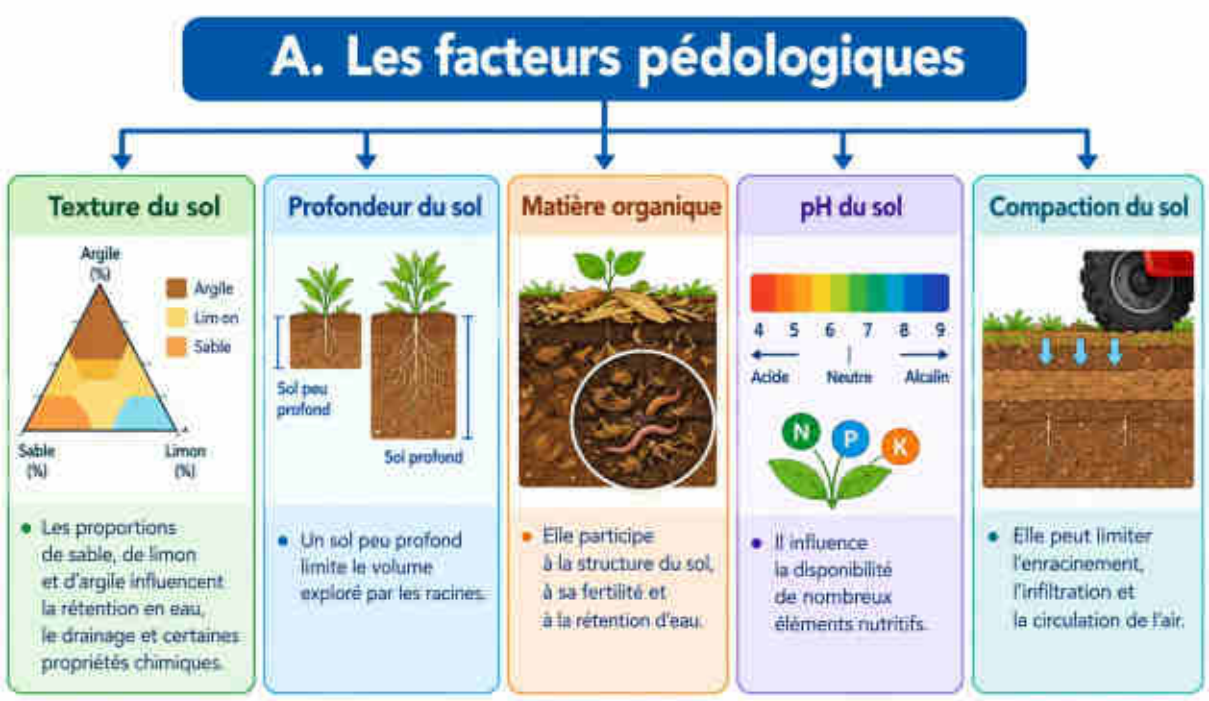


Figure A : Les principaux facteurs pédologiques influençant la variabilité des sols agricoles.

Une différence de rendement associée à la texture ou à la profondeur ne doit pas être interprétée automatiquement comme une carence en éléments nutritifs.

B. Les facteurs topographiques

La position dans le relief peut modifier les transferts d'eau, le drainage, l'érosion et parfois les conditions thermiques locales.

Une zone basse peut accumuler l'eau et présenter un engorgement temporaire. Une zone en pente peut être exposée au ruissellement et à la perte de particules fines.

Ces phénomènes peuvent modifier la fertilité et la disponibilité de l'eau. La fertilisation seule ne permet pas de corriger un problème de drainage ou d'érosion.

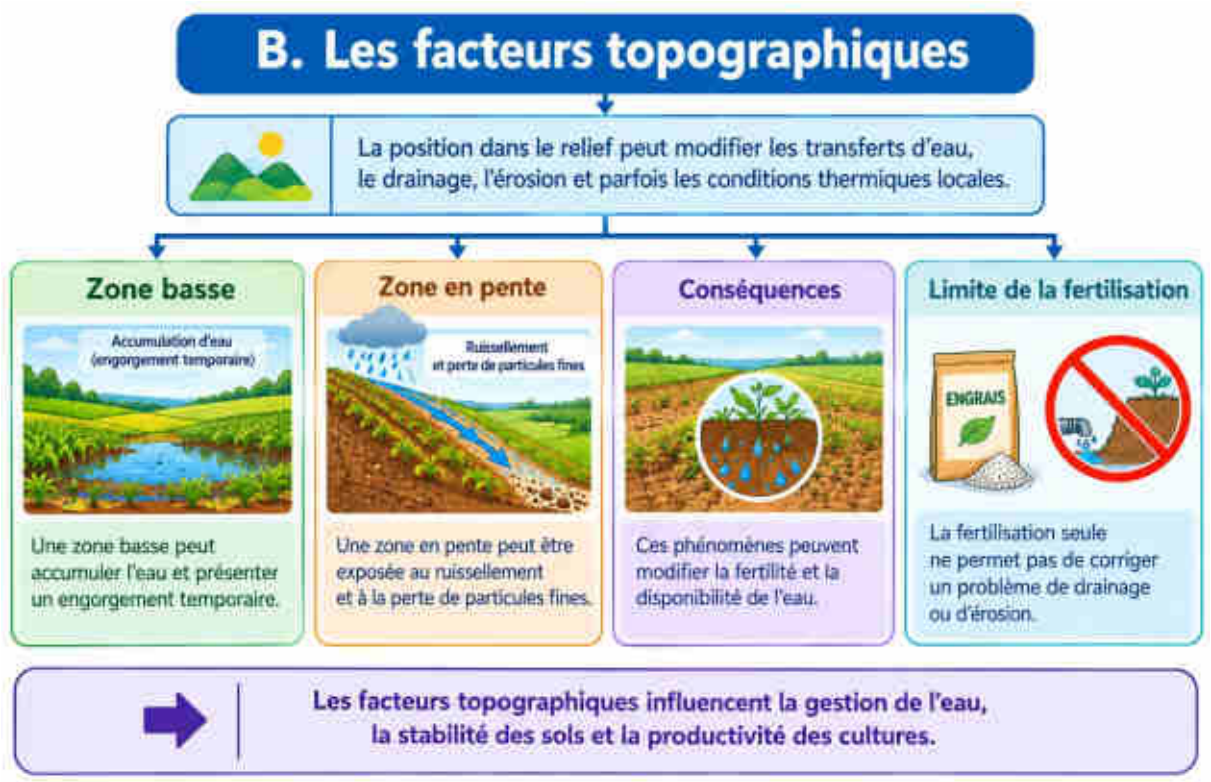


Figure B : Influence des facteurs topographiques sur la distribution de l'eau, le drainage et l'érosion des sols.

C. Les facteurs liés à la conduite culturale

Les interventions antérieures peuvent laisser des effets durables ou temporaires :

- Des apports organiques localisés peuvent créer des différences de matière organique et de nutriments.
- Des passages répétés d'engins peuvent provoquer une compaction.

- Les précédents culturaux peuvent modifier les reliquats azotés et les risques sanitaires.

- Une levée irrégulière peut produire des différences de densité et de développement.

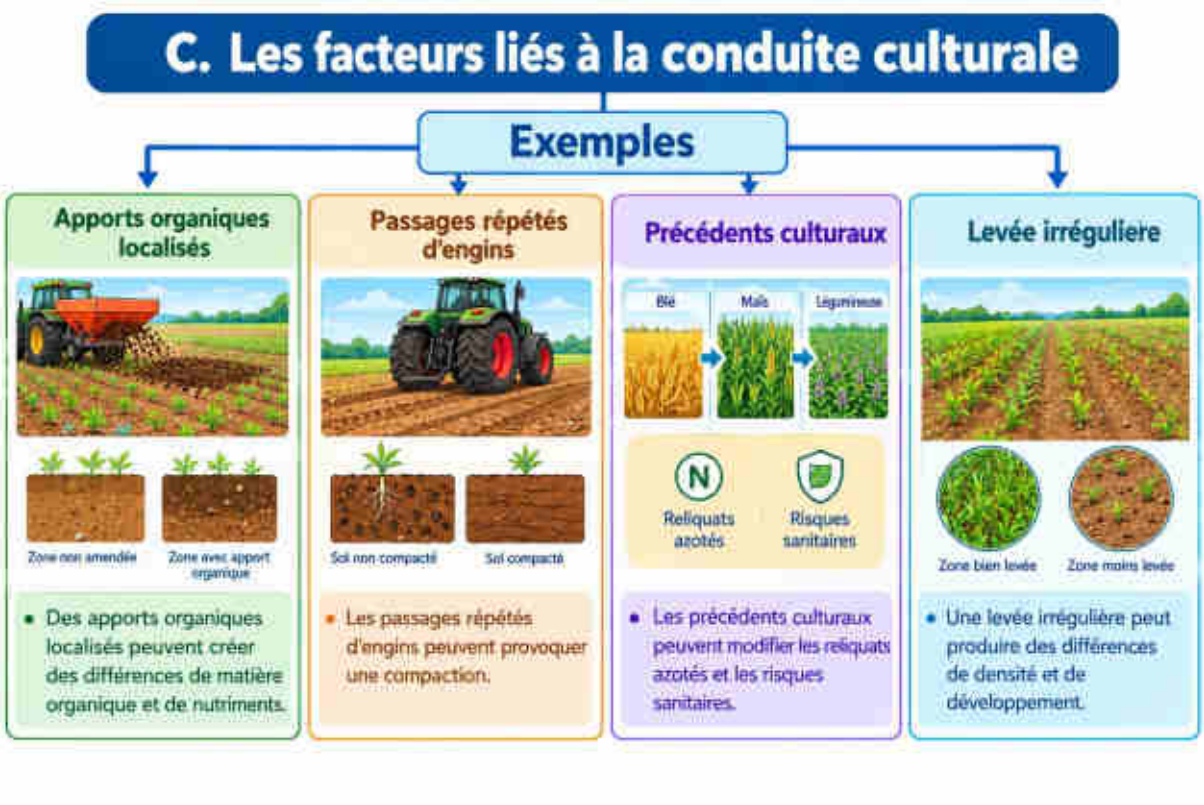


Figure C : Effets des pratiques culturales sur l'hétérogénéité des parcelles agricoles.

D. Les facteurs climatiques et biologiques

La sécheresse, le gel, les maladies et les ravageurs peuvent créer des différences de croissance ou de rendement.

Cependant, toutes ces différences ne sont pas stables d'une année à l'autre. Une zone affectée par un foyer ponctuel de maladie ne doit pas nécessairement recevoir la même prescription l'année suivante.

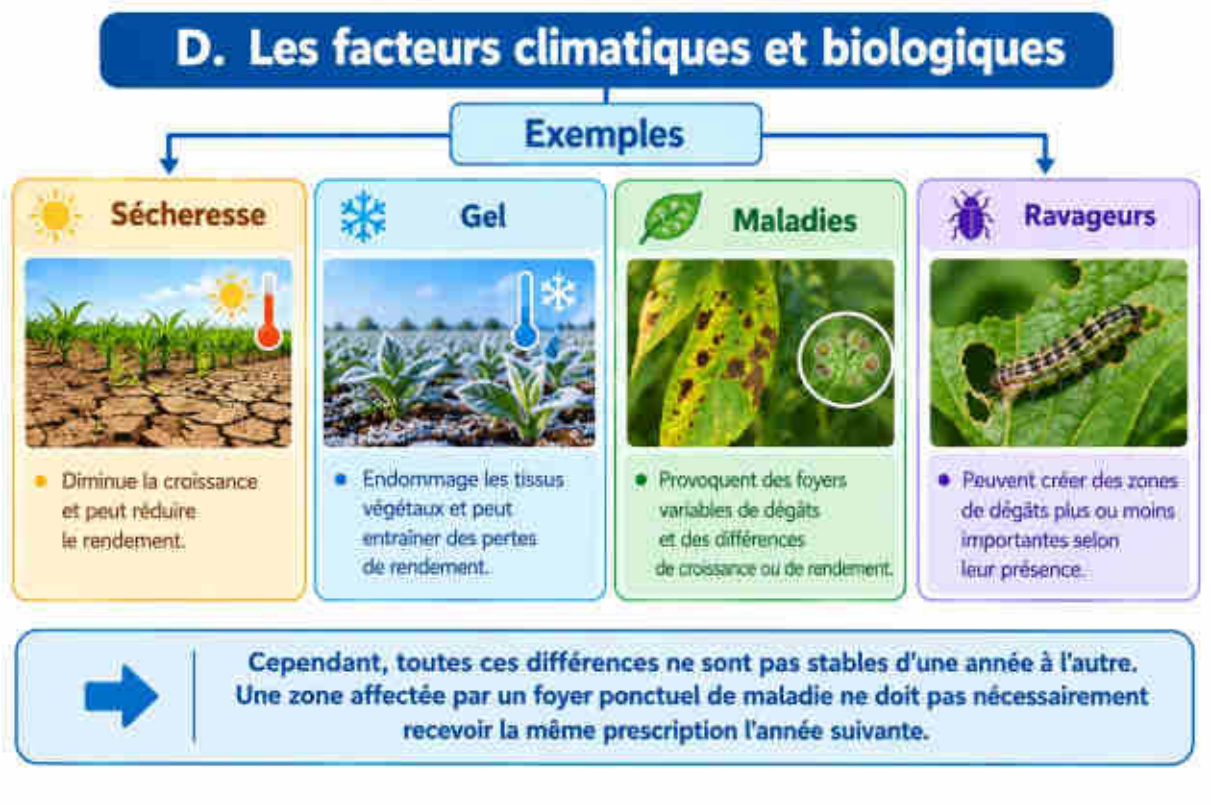


Figure D : Influence des facteurs climatiques et biologiques sur la croissance et le rendement des cultures.

E. Les erreurs de mesure

Une carte peut présenter une hétérogénéité qui ne correspond pas à une différence agronomique réelle.

Par exemple, un capteur de rendement mal calibré, un décalage de géolocalisation ou une donnée mal enregistrée peut produire des valeurs anormales.

Il est donc indispensable de distinguer :

- la variabilité agronomique réelle ;
- la variabilité temporaire liée aux conditions de l'année ;
- l'incertitude de mesure ;
- l'erreur de traitement ou de représentation des données.

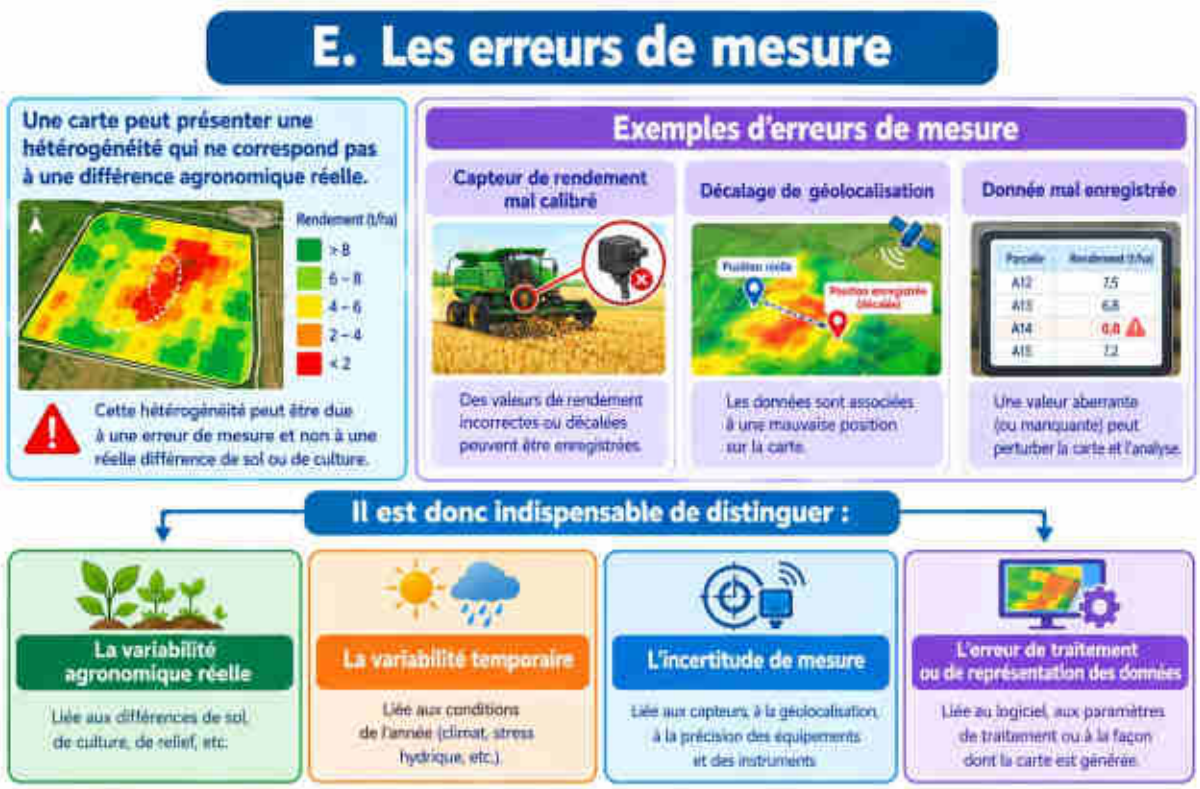


Figure E : Exemples d'erreurs de mesure et distinction entre variabilité réelle et incertitude des données agricoles.

Une donnée anormale ne doit être ni supprimée automatiquement ni interprétée immédiatement comme un phénomène réel. Elle doit être vérifiée.

1.2.3. Exemple d'identification des sources de variabilité

Considérons une parcelle de 25 ha cultivée en blé dur. Sur trois campagnes successives, une zone de 4 ha présente un rendement inférieur d'environ 25 % à celui du reste de la parcelle.

Les observations indiquent que cette zone est caractérisée par un sol sableux, une faible profondeur et une conductivité électrique apparente plus faible.

La démarche de diagnostic est la suivante :

1. Observation : repérer la zone de faible rendement sur les cartes de plusieurs années.

2. Vérification : contrôler la qualité des données de rendement et leur géolocalisation.

3. Caractérisation : confronter les cartes de rendement aux analyses du sol, à la topographie et aux observations de terrain.

4. Interprétation : formuler l'hypothèse d'une faible réserve utile en eau liée à la texture et à la profondeur.

5. Décision : ne pas augmenter automatiquement la dose d'azote ; vérifier d'abord la disponibilité en eau et les autres facteurs limitants.

Cette situation illustre un principe fondamental : une zone à faible rendement n'est pas nécessairement une zone qui manque d'engrais. Le facteur limitant doit être identifié avant de choisir l'intervention.

1.3. De la variabilité observée à la décision agronomique

1.3.1. La variabilité est-elle toujours contrôlable ?

Non. Certaines différences peuvent être corrigées directement, d'autres peuvent seulement être prises en compte dans la gestion, tandis que certaines ne peuvent pas être maîtrisées par une intervention agricole réaliste à court terme.

Pour l'agriculture de précision, il est utile de distinguer trois catégories :

Catégorie 1

Variabilité directement ou relativement contrôlable

Exemples : ajustement de la fertilisation, adaptation de l'irrigation, modulation du semis, désherbage localisé lorsque la détection est fiable.

Catégorie 2

Variabilité partiellement contrôlable

Exemples : texture, profondeur du sol, topographie. Ces caractéristiques ne sont généralement pas modifiables rapidement, mais elles peuvent guider le choix des cultures, des objectifs de rendement, de l'irrigation ou des aménagements.

Catégorie 3

Variabilité non contrôlable ou non pertinente à corriger directement

Exemples : pluie imprévisible, grêle, gel exceptionnel. La stratégie consiste à surveiller le risque, à adapter les décisions lorsque cela est possible et à éviter de confondre un événement ponctuel avec une caractéristique permanente.

L'erreur de mesure constitue un cas particulier : ce n'est pas une catégorie de variabilité agronomique, mais une anomalie à détecter et à traiter dans les données.

La notion de contrôlabilité est relative. Un facteur peut être difficile à modifier à court terme, mais faire l'objet d'une amélioration progressive grâce à des pratiques adaptées.

1.3.2. Tableau de décision : cause, outil et intervention

Facteur observé	**Intervention potentiellement pertinente**	**Précaution**
Différences de besoins azotés	Fertilisation modulée	Vérifier les besoins, les reliquats et le stade cultural
Déficit hydrique différencié	Pilotage de l'irrigation par zone	Vérifier l'humidité, la réserve utile et le système d'irrigation
pH hétérogène	Amendement ou chaulage localisé	Confirmer par analyse et calculer les besoins
Compaction	Diagnostic physique et décompactage si justifié	Vérifier la profondeur et les conditions d'intervention
Faible profondeur du sol	Adaptation des objectifs de rendement et de la conduite	Ne pas supposer qu'un supplément d'engrais corrigera la limitation

Adventices localisées	Désherbage ciblé	Confirmer l'identification et le seuil d'intervention
Maladie localisée	Surveillance et traitement ciblé si justifié	Confirmer le diagnostic et respecter les règles d'utilisation
Erreur de mesure	Contrôle, correction ou exclusion justifiée de la donnée	Conserver une traçabilité des corrections

Le tableau montre qu'il faut raisonner selon la séquence cause → intervention appropriée, et non selon la séquence outil disponible → intervention.

Par exemple, posséder un épandeur à dose variable ne justifie pas de moduler l'azote si le diagnostic révèle que les différences de rendement sont principalement dues à la profondeur du sol.

1.3.3. Les trois questions avant toute modulation

Avant d'établir une carte de prescription, l'ingénieur agronome doit répondre à trois questions.

1.La variabilité est-elle réelle et suffisamment caractérisée ?

Vérifier la qualité des données, la cohérence des observations et la répétition éventuelle du phénomène. Plusieurs années de données sont particulièrement utiles pour identifier une variabilité structurelle, mais leur nombre doit être adapté au phénomène et aux données disponibles.

2.L'intervention envisagée peut-elle agir sur la cause ?

Si la limitation est hydrique, une augmentation d'engrais peut être inefficace. Si la limitation vient de la compaction, il faut examiner les solutions physiques ou les pratiques de prévention adaptées.

3.Le bénéfice attendu justifie-t-il le coût de la différenciation ?

Comparer les gains potentiels aux coûts supplémentaires : équipement, cartographie, analyses, temps de travail, maintenance et complexité de l'intervention.

Ces trois questions conduisent à quatre décisions possibles :

- Ne pas moduler parce que la variabilité observée est incertaine.
- Changer d'intervention parce que l'outil envisagé ne traite pas la cause.
- Conserver une gestion uniforme lorsque la modulation n'est pas suffisamment rentable.
- Mettre en place une gestion différenciée lorsque les conditions agronomiques, techniques et économiques sont réunies.

Exemple pédagogique

Une parcelle présente une faible vigueur végétale dans une zone sableuse. L'agriculteur souhaite augmenter la dose d'azote.

Le diagnostic révèle que cette zone souffre principalement d'un déficit hydrique.

La décision appropriée n'est pas d'augmenter automatiquement l'azote. Il faut examiner la disponibilité de l'eau, la profondeur du sol, les possibilités de pilotage de l'irrigation et la capacité réelle de la culture à valoriser un apport supplémentaire.

1.4. Le cycle de décision en agriculture de précision

1.4.1. Présentation générale

L'agriculture de précision repose sur un cycle de décision qui transforme les observations en interventions, puis utilise les résultats pour améliorer les décisions futures.

Ce cycle comporte cinq étapes :

1. OBSERVATION

Collecter des données géolocalisées

2. CARACTÉRISATION

Contrôler, analyser et expliquer la variabilité

3. PRESCRIPTION

Définir les zones et les interventions

4. APPLICATION

Exécuter la décision sur le terrain

5. ÉVALUATION

Mesurer les résultats et améliorer la décision

L'évaluation alimente le cycle suivant : il s'agit d'une boucle d'amélioration continue.

1.4.2. Étape 1 — Observation et collecte des données

L'observation consiste à recueillir les informations nécessaires pour décrire la parcelle et les différences entre ses zones.

Les principales sources de données sont :

- Les observations visuelles sur le terrain.
- Les analyses de sol géolocalisées.
- Les cartes de rendement.
- Les images satellitaires et les images acquises par drone.
- Les mesures d'humidité du sol.
- Les données météorologiques.
- Les informations sur les interventions antérieures.

Les données doivent être accompagnées d'informations essentielles : date, localisation, unité de mesure, méthode d'acquisition et, selon le cas, profondeur de prélèvement ou stade de la culture.

Exemple : une analyse de sol indiquant une teneur en azote sans précision sur la méthode, la profondeur ou la date peut être difficile à interpréter correctement.

1.4.3. Étape 2 — Caractérisation de la variabilité

La caractérisation consiste à transformer les données brutes en informations agronomiques interprétables.

Elle comprend notamment :

1. Le contrôle de la qualité des mesures.
2. Le traitement des valeurs aberrantes.
3. La comparaison des zones et des périodes.
4. L'analyse des relations entre les variables.
5. La formulation et la vérification d'hypothèses agronomiques.

Un indice de végétation élevé peut traduire une végétation plus développée, mais il ne démontre pas à lui seul que la nutrition azotée est satisfaisante. L'état hydrique, le stade de développement, la densité du couvert et d'autres facteurs peuvent également influencer le signal mesuré.

De même, une faible valeur d'un indice ne constitue pas automatiquement la preuve d'une carence.

Le diagnostic doit confronter plusieurs sources d'information et, lorsque cela est nécessaire, être confirmé sur le terrain.

1.4.4. Étape 3 — Élaboration de la prescription

Une prescription traduit le diagnostic en une règle d'intervention.

Elle peut préciser :

- Les zones de gestion.
- La dose à appliquer dans chaque zone.

- La date ou la période d’intervention.
- Les conditions de déclenchement.
- Les contraintes techniques et agronomiques.
- Les indicateurs à utiliser pour évaluer le résultat.

Une carte de prescription peut être construite à partir de données géographiques. Elle doit être compatible avec les possibilités réelles de la machine, notamment la largeur de travail, la précision de positionnement, la résolution spatiale et le temps de réponse du système.

Une carte très détaillée n’est pas nécessairement une bonne carte : les zones doivent être suffisamment fiables et opérationnelles pour que l’intervention puisse être réalisée correctement.

1.4.5. Étape 4 — Application sur le terrain

L’application consiste à exécuter la prescription au moyen du matériel et des pratiques adaptés.

Elle peut mobiliser :

- Un épandeur d’engrais à dose variable.
- Un système d’irrigation piloté.
- Un semoir à densité variable.
- Un pulvérisateur capable de traiter uniquement les zones ciblées.
- Un système de guidage et de géolocalisation.

Avant l’intervention, il faut vérifier la compatibilité de la carte, la calibration du matériel, les unités, les limites de dose et le fonctionnement du système de régulation.

Une prescription agronomiquement correcte peut échouer si la machine applique des quantités différentes de celles prévues.

1.4.6. Étape 5 — Évaluation des résultats

L’évaluation détermine si la stratégie mise en place a atteint l’objectif fixé.

Les indicateurs peuvent comprendre :

- Le rendement et sa distribution spatiale.
- La qualité de la récolte.
- La quantité totale d’intrants utilisée.
- Le coût de production.
- La marge économique.
- L’efficience d’utilisation de l’eau.
- Les pertes potentielles de nutriments et les effets environnementaux.

Lorsque cela est possible, il est utile de comparer une zone traitée à une zone témoin comparable, en tenant compte des différences initiales et des conditions de l’année.

Une comparaison sur plusieurs campagnes peut être nécessaire pour distinguer l’effet de l’intervention des effets du climat.

1.4.7. Les erreurs et leur propagation

Chaque étape du cycle peut introduire une erreur.

Étape	**Erreur possible**	**Conséquence**
Observation	Capteur mal calibré	Mesures biaisées
Caractérisation	Confusion entre stress hydrique et carence	Mauvais diagnostic
Prescription	Dose calculée sans tenir compte des besoins réels	Intervention inadaptée

Application	Épandeur mal réglé	Écart entre dose prescrite et dose appliquée
Évaluation	Absence de témoin ou données insuffisantes	Conclusion peu fiable

Une erreur initiale peut se propager jusqu'à l'évaluation. Il faut donc examiner toute la chaîne avant de conclure à l'efficacité ou à l'inefficacité d'une technologie.

À retenir : l'agriculture de précision est un processus complet de gestion et de décision. Elle ne se limite ni à la collecte des données ni à l'utilisation d'une machine automatisée.

1.5. Calcul de l'effet d'une modulation sur les intrants

1.5.1. Pourquoi calculer les quantités totales ?

La modulation consiste à adapter les doses selon les zones d'une parcelle. Elle peut entraîner une augmentation, une diminution ou une stabilité de la quantité totale d'intrants.

Il est donc incorrect d'affirmer systématiquement que la modulation permet d'économiser des engrais ou de l'eau.

La quantité totale dépend des surfaces, des doses choisies et de l'objectif agronomique.

1.5.2. Formules fondamentales

Pour une parcelle divisée en n zones :

$$Q_{modulé} = \sum_{i=0}^{n} S_i \times D_i$$

Avec :

- $Q_{modulé}$: quantité totale d'intrant ;
- S_i: surface de la zone i, en hectares ;
- D_i: dose appliquée dans la zone i, en kg/ha ou dans toute autre unité cohérente.

Pour une application uniforme :

$$Q_{uniforme} = S_{totale} \times D_{uniforme}$$

L'écart entre les deux stratégies est :

$$\Delta Q = Q_{modulé} - Q_{uniforme}$$

L'écart relatif est :

$$E(\%) = \frac{\Delta Q}{Q_{uniforme}} \times 100$$

Une valeur positive indique une augmentation de la quantité totale ; une valeur négative indique une diminution.

Ces formules supposent que les surfaces et les doses sont exprimées dans des unités compatibles et que la quantité calculée correspond bien à la même substance dans les deux stratégies.

1.5.3. Exemple 1 — Modulation avec augmentation des doses sur certaines zones faibles

Une parcelle de 20 ha reçoit normalement une dose uniforme de 120 kg N/ha. Une nouvelle stratégie prévoit les doses suivantes :

Zone	Surface (ha)	Dose (kg N/ha)	Quantité totale (kg N)
A — Potentiel élevé	6	100	600
B — Potentiel moyen	8	120	960
C — Zone sableuse	4	145	580
D — Sol superficiel	2	150	300
Total	20	—	2 440

Étape 1 : calcul de la quantité uniforme

$$Q_{uniforme} = 20 \times 120 = 2400\ kg\ N$$

Étape 2 : calcul de la quantité modulée

$$Q_{modulé} = 600 + 960 + 580 + 300 = 2440\ kg\ N$$

Étape 3 : calcul de l'écart

$$\Delta Q = 2440 - 2400 = 40\ kg\ \text{N}$$

Étape 4 : calcul de l'écart relatif

$$E(\%) = \frac{40}{2400} \times 100 \approx 1{,}67\%$$

La stratégie modulée augmente donc la quantité totale d'azote d'environ 1,67 %.

Cela peut être cohérent avec un objectif de soutien de certaines zones, à condition que les doses soient agronomiquement justifiées. Ce calcul ne démontre toutefois pas que le rendement augmentera ni que la stratégie sera rentable.

1.5.4. Exemple 2 — Modulation avec réduction des doses sur les zones à faible potentiel

On considère la même parcelle de 20 ha, avec une dose uniforme de référence de 120 kg N/ha.

La règle retenue consiste à augmenter la dose sur la zone à fort potentiel et à réduire les doses dans les zones où la culture valorise moins l'azote.

Zone	Surface (ha)	Dose (kg N/ha)	Quantité totale (kg N)
A — Potentiel élevé	6	140	840
B — Potentiel moyen	8	120	960

C — Potentiel faible	4	100	400
D — Potentiel très faible	2	90	180
Total	20	—	2 380

La quantité uniforme est toujours égale à 2 400 kg N.

La quantité modulée est :

$$Q_{modulé} = 840 + 960 + 400 + 180 = 2380\ kg\ N$$

L'écart est :

$$\Delta Q = 2380 - 2400 = -20\ kg\ \text{N}$$

L'écart relatif est :

$$E(\%) = \frac{-20}{2400} \times 100 \approx -0{,}83\ \%$$

La stratégie réduit donc la quantité totale d'azote d'environ 0,83 %.

Cette économie est faible dans cet exemple. Il faudrait analyser le coût de la modulation, les gains de rendement éventuels et les risques environnementaux avant de conclure à sa pertinence.

1.5.5. Comparaison des deux stratégies

Stratégie	**Quantité totale**	**Écart par rapport à l'uniforme**	**Interprétation**
Uniforme	2 400 kg N	Référence	Dose constante sur 20 ha

Modulation, doses renforcées sur certaines zones faibles	2 440 kg N	+1,67 %	Quantité totale plus élevée
Modulation, doses réduites sur les zones peu valorisantes	2 380 kg N	−0,83 %	Quantité totale légèrement plus faible

La modulation ne possède donc pas un effet unique. Le résultat dépend de la règle choisie, des surfaces concernées, des doses et de la distribution des zones.

1.5.6. Vérifications agronomiques et économiques

Avant toute application, il faut vérifier :

La cohérence agronomique. Les doses doivent être fondées sur les besoins de la culture, les analyses disponibles, le stade de développement, les apports antérieurs et le rendement visé.

Les contraintes réglementaires. Les règles locales relatives aux apports d'engrais et à la protection de l'environnement doivent être respectées. Une moyenne conforme ne garantit pas que chaque dose locale soit autorisée.

La faisabilité technique. La machine doit pouvoir appliquer les doses prévues avec une précision suffisante.

La rentabilité. Le coût des analyses, des cartes, des équipements et du travail supplémentaire doit être comparé aux bénéfices attendus.

Les doses utilisées dans les deux exemples sont exclusivement pédagogiques. Elles ne constituent pas des recommandations de fertilisation pour une parcelle réelle.

1.6. Erreurs fréquentes en agriculture de précision

La maîtrise des technologies ne suffit pas à garantir une décision agronomique correcte. Les erreurs de raisonnement peuvent compromettre les résultats même lorsque les outils fonctionnent correctement.

Erreur fréquente	Pourquoi est-ce problématique ?	Démarche corrective
Confondre variabilité et erreur de mesure	Une anomalie technique peut être interprétée comme une différence réelle du sol	Contrôler la qualité des données
Moduler sans identifier la cause	L'intervention risque d'être inefficace	Réaliser un diagnostic agronomique
Considérer une carte comme une vérité absolue	Les cartes comportent des incertitudes et dépendent des conditions d'acquisition	Vérifier les résultats sur le terrain
Utiliser une seule année de données pour une décision durable	Les effets du climat peuvent être confondus avec des différences structurelles	Comparer plusieurs années lorsque cela est pertinent
Croire que moduler signifie économiser	Le total des intrants peut augmenter	Calculer les quantités avant l'intervention
Négliger la calibration des machines	Les doses appliquées peuvent différer des doses prescrites	Vérifier et calibrer le matériel
Oublier l'évaluation	L'efficacité de l'intervention reste inconnue	Prévoir des indicateurs de suivi et, si possible, une zone témoin

Une attention particulière doit être accordée à la distinction entre observation, interprétation et décision. Une observation indique ce qui est mesuré ; l'interprétation propose une explication ; la décision choisit une action en tenant compte des objectifs et des contraintes.

Ces trois niveaux ne doivent pas être confondus.

1.7. Application de la démarche au contexte agricole algérien

L'agriculture de précision peut contribuer à améliorer la gestion des ressources dans les systèmes agricoles algériens, notamment dans les régions soumises à des contraintes hydriques importantes.

Les applications doivent toutefois être adaptées aux caractéristiques des exploitations, aux cultures, aux ressources disponibles et au coût des technologies.

1.7.1. Exemple : culture du blé dur en zone semi-aride

Dans une exploitation céréalière, une parcelle de blé dur présente trois zones de croissance différentes :

- Une zone profonde présentant une bonne croissance.
- Une zone sableuse où le stress hydrique apparaît plus rapidement.
- Une zone compacte où l'enracinement semble limité.

Une conduite uniforme peut ne pas répondre aux besoins de chacune de ces zones. La démarche de précision consiste à identifier les causes, à caractériser les différences et à choisir des interventions adaptées.

La zone sableuse peut nécessiter une réflexion sur la gestion de l'eau et le choix de l'objectif de rendement. La zone compacte doit faire l'objet d'un diagnostic physique. La zone profonde peut présenter un potentiel supérieur, mais ses besoins en azote doivent également être vérifiés.

Il ne faut pas déduire automatiquement les doses d'engrais de la seule vigueur observée.

1.7.2. Exemple : pilotage de l'irrigation

Dans une parcelle irriguée, les besoins en eau peuvent varier selon le sol, la profondeur racinaire, le stade de la culture et les conditions météorologiques.

Une stratégie de précision peut associer :

- Des mesures d'humidité du sol.

- Des données météorologiques.
- L'estimation des besoins en eau de la culture.
- La connaissance des caractéristiques du système d'irrigation.
- Le suivi de la réponse de la culture.

L'objectif est de mieux adapter les apports aux besoins et à la capacité du sol à stocker l'eau, tout en évitant le sous-arrosage et les apports excessifs.

1.7.3. Exemple : choix des technologies selon la taille de l'exploitation

Une petite exploitation maraîchère et une grande exploitation céréalière n'ont pas nécessairement besoin des mêmes équipements.

Pour une petite exploitation, des observations de terrain bien organisées, des analyses de sol ciblées et des outils simples de cartographie peuvent constituer un premier niveau de gestion de précision.

Une grande exploitation peut envisager des équipements de guidage, des cartes de rendement et des systèmes d'application à dose variable, si leur coût est justifié.

La technologie doit donc être choisie en fonction du problème agronomique, des compétences disponibles, de la taille de l'exploitation et du bénéfice attendu.

1.8. Synthèse générale du chapitre

L'agriculture de précision est une démarche de gestion agronomique fondée sur la prise en compte de l'hétérogénéité des parcelles et sur l'adaptation raisonnée des interventions.

Trois idées structurent ce chapitre.

Première idée : toute variabilité ne justifie pas une modulation. Il faut vérifier que le phénomène est réel, comprendre sa cause et déterminer si une intervention différenciée peut améliorer la situation.

Deuxième idée : l'agriculture de précision est un processus de décision. Les cinq étapes — observation, caractérisation, prescription, application et évaluation — sont interdépendantes. Une erreur à une étape peut compromettre l'ensemble de la démarche.

Troisième idée : la modulation ne signifie pas nécessairement une économie. Elle peut augmenter ou diminuer les quantités d'intrants. Son intérêt doit être évalué à partir des objectifs agronomiques, des coûts, des résultats et des contraintes environnementales.

Ces fondements serviront de base à l'étude des systèmes de géolocalisation, des SIG, de la télédétection, des capteurs, de la fertilisation modulée et de l'irrigation de précision.

Vocabulaire essentiel

Terme	**Définition**
Agriculture de précision	Gestion agricole tenant compte des variabilités spatiales et temporelles
Variabilité spatiale	Différences entre les zones d'une parcelle
Variabilité temporelle	Évolution d'une caractéristique au cours du temps
Géolocalisation	Association d'une observation à une position géographique
Caractérisation	Analyse des données pour décrire et expliquer les différences
Zone de gestion	Partie d'une parcelle présentant des caractéristiques justifiant une conduite particulière
Prescription	Règle définissant l'intervention à réaliser selon la zone ou les conditions
Dose variable	Quantité d'intrant adaptée aux besoins ou aux caractéristiques identifiés

Carte de prescription	Représentation géographique des interventions prévues
Évaluation	Mesure des résultats obtenus après l'intervention

Conclusion générale

Ce chapitre constitue le socle méthodologique du module d'agriculture de précision. Il prépare les étudiants à comprendre non seulement les outils technologiques, mais aussi la logique agronomique qui permet de les utiliser correctement.

La compétence essentielle attendue de l'étudiant est de pouvoir partir d'un problème observé sur une parcelle, identifier les données nécessaires, analyser les causes probables, choisir une intervention justifiée et évaluer les résultats.

Le fil conducteur à retenir pour l'ensemble du module est donc :

Observer → mesurer → caractériser → décider → intervenir → évaluer.

C'est cette démarche qui permettra ensuite de comprendre et de mobiliser efficacement le GNSS, les SIG, la télédétection, les capteurs, les cartes de prescription et les systèmes d'application à dose variable.

Bibliographie et ressources scientifiques

1. Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). Aspects of Precision Agriculture. Advances in Agronomy, 67, 1–85. Référence fondamentale pour les principes et les fondements de l'agriculture de précision.

2. Plant, R. E. (2001). Site-specific management: The application of information technology to crop production. Computers and Electronics in Agriculture, 30(1–3), 9–29. Référence sur la gestion localisée et l'utilisation de l'information dans la production agricole.

3. Booltink, H. W. G., et al. (2001). Référence à compléter à partir de la notice bibliographique originale utilisée dans votre document, afin de garantir l'exactitude du titre, des auteurs et de la publication.

4. Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. Biosystems Engineering, 114(4), 358–371. Référence sur les apports de la télédétection et les limites de son utilisation en agriculture de précision.

5. Bahri & El Aissaoui (2021/2022). Référence mentionnée dans les documents de travail antérieurs ; le titre, les auteurs complets et la publication doivent être vérifiés avant son intégration définitive à la bibliographie académique.

6. Karn et al. (2025). Référence mentionnée dans les documents de travail antérieurs ; la notice complète doit être vérifiée avant citation scientifique définitive.

7. QGIS Documentation. Documentation officielle du logiciel QGIS, utile pour les notions de cartographie et de systèmes d'information géographique : Documentation officielle QGIS.

8. Copernicus Data Space Ecosystem. Ressource pour l'accès aux données satellitaires européennes : Copernicus Data Space Ecosystem.