QUESTION 67

INNOVATIVE TECHNOLOGY AND PRACTICES FOR INCREASING WATER USE EFFICIENCY. IRRIGATION MANAGEMENT AND SERVICES, REMOTE SENSING, IRRIGATION EQUIPMENT, ... WHERE DO WE STAND?

TECHNOLOGIES ET PRATIQUES INNOVANTES POUR ACCROÎTRE L'EFFICACITÉ DE L'UTILISATION DE L'EAU : GESTION ET SERVICES D'IRRIGATION, TÉLÉDÉTECTION, MATÉRIEL D'IRRIGATION,... OÙ EN SOMMES-NOUS ?

GENERAL REPORTER / RAPPORTEUR GÉNÉRAL

Maher Salman (FAO)

PANEL OF EXPERTS / GROUPE D'EXPERTS

Dr. Bruno Cheviron (France)

Prof.Dr. Gilles Belaud (France)

Dr. Wang Zhen (China)

Dr. Eva Pek (FAO)

Dr. Vivek Kapadia (India)

Prof. Kuo-Wei Liao (Chinese Taipei)

Prof. Miguel Ángel Moreno Hidalgo (Spain)

Engr. Prof. Henry Igbadun (Nigeria)

Prof. Mykhailo Romashchenko (Ukraine)

Prof.Dr. Nutchanart Sriwongsitanon (Thailand)

Prof. Guido D'Urso (Italy)

QUESTION 67:

INNOVATIVE TECHNOLOGY AND PRACTICES FOR INCREASING WATER USE EFFICIENCY. IRRIGATION MANAGEMENT AND SERVICES, REMOTE SENSING, IRRIGATION EQUIPMENT, ... WHERE DO WE STAND?

GENERAL REPORT

Maher Salman (FAO)*
General Reporter

1. INTRODUCTION

Question 67 asks where irrigation stands with respect to innovative technology and practices for increasing water use efficiency, across irrigation management and services, remote sensing and irrigation equipment. The Question is articulated around two complementary scales. Sub-Question 67.1 addresses the plot and farm levels, where irrigation practices and technologies reflect individual skills, objectives, and decisions, and asks how these can be evaluated and improved. Sub-Question 67.2 addresses the territorial scale, where irrigation water management is jointly influenced by agricultural, economic, environmental and regulatory drivers, and asks how the decision-making process can be explained and improved.

The two sub-questions, therefore, trace a single trajectory, from the individual decision at the field edge to the collective decision at scheme, basin, and national levels. The 117 contributions analysed for this report (64 under Q.67.1 and 53 under Q.67.2), from authors and study areas in at least 35 countries (Figure 1), allow a comprehensive answer to the "where do we stand?" of the Question title. Read together, they show a discipline in transition: observation tools that were experimental a decade ago are now operational infrastructure, while the binding constraints on water use efficiency are increasingly institutional, economic and human rather than purely technical.

This report follows the structure of the Question. Section 2 offers a quantitative portrait of the contributions. Section 3 presents the response to Sub-Question 67.1, and Section 4 the response to Sub-Question 67.2, in each case organized by the analytical themes that emerge from the papers rather than paper-by-paper. Every contribution is cited by its R-number at least once. Section 5 draws the transversal reading: convergences, trade-offs, and a four-level reading of the innovations presented; and Section 6 concludes with a synthetic answer to the Question and the recommendations that follow from it.

2. PORTRAIT OF THE CONTRIBUTIONS

The contributions span a wide geographical and methodological range. Contributions originate from Europe (with a strong presence of the host country, France, particularly on territorial water services and Earth Observation), East, South-East and South Asia (China, Thailand, Taiwan, Korea, Japan, Malaysia, Indonesia, India, Pakistan, Nepal, Bangladesh), the Middle East and North Africa (Iran, Jordan, Saudi Arabia, Algeria, Morocco, Tunisia, Türkiye, Egypt), Sub-Saharan Africa (Mali, Senegal, Rwanda, Zimbabwe, South Africa), and the Americas (United States, Canada).

* Senior Land & Water Officer | Agricultural Water Management Team Lead, Adaptation Fund Unit Coordinator, Land and Water Division (NSL) | FAO-UN, Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy, Tel: +39 06 570 54718, E-mail: Maher.Salman@fao.org

117 Papers analysed | 35 Countries with mapped study areas | 101 Study sites on the map

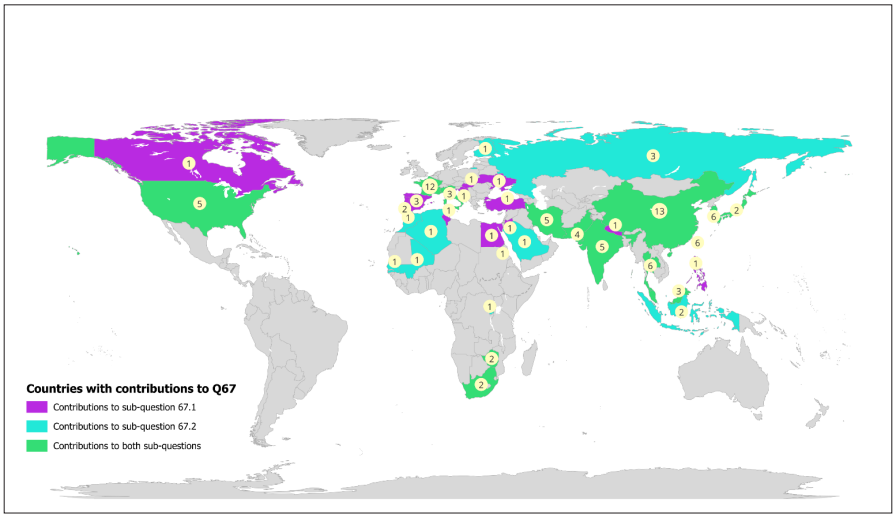

Figure 1. Geography of the contributions to Question 67. Countries are shaded by coverage: contributions to Sub-Question 67.1 (12 countries), to Sub-Question 67.2 (9), or to both (14). Numbers give the papers with study areas in each country. Contributions with global, multi-regional or conceptual scope are not mapped. Representation is at country level; study areas are sub-national and are described in the text.

Methodologically, the single most visible feature across the papers is the maturity of Earth Observation and data-driven approaches: roughly half of all contributions rely on satellite or Unmanned aerial vehicle (UAV) observation, and machine-learning components appear across both sub-questions, from field-scale evapotranspiration and soil moisture retrieval to reservoir storage prediction, flood-loss estimation and basin-scale water accounting. It is noticeable that machine-learning algorithms tends to substitute more and more physically based algorithms which have set the standard for many years. However, comparative analyses of the two approaches are missing, as well as considerations about the transferability of ML approaches in different contexts and even different time frames within the same study area, diversely from physically based approaches which are transferable by definition.

A second, equally significant feature is the weight of institutional, economic and social analysis, which is no longer confined to a residual category but constitutes a coherent body of evidence in both sub-questions.

The geography of Figure 1 calls for two reading notes. The strong French presence largely reflects the host country and should not be read as a thematic signal. More substantively, regional priorities differ in ways that shape the evidence: integration and modernization of water services dominate in Europe, adoption within collective rice systems in South and South-East Asia, scarcity, groundwater stress and salinity in the Middle East and North Africa, and operational information in large, data-constrained systems in Sub-Saharan Africa. Similar technologies appear across the whole map, but the outcomes described depend heavily on the context in which they are applied.

2.1 Key messages at a glance

Six messages summarise the contributions; each is developed in the body of the report.

1. **Observation has become infrastructure:** Satellite-based monitoring of evapotranspiration, irrigated areas and water productivity is now operational at farm and territorial scales, no longer experimental (e.g. R.67.1.01, R.67.1.06, R.67.1.26; R.67.2.02, R.67.2.48, R.67.2.50, R.67.2.53).
2. **Management is shifting from reactive to proactive:** Forecasting (seasonal, sub-seasonal and event-based) enters operational decision chains at every scale (R.67.1.48, R.67.1.53, R.67.1.18; R.67.2.01, R.67.2.05, R.67.2.03).
3. **Technology alone does not save water:** Without institutions, incentives and allocation management that transmit scarcity to users, field-scale efficiency gains do not translate into basin-scale savings (R.67.1.11, R.67.1.16, R.67.1.57, R.67.1.58, R.67.1.63; R.67.2.16, R.67.2.20, R.67.2.37, R.67.2.43).
4. **Co-creation and trust-building drive adoption:** Where tools are designed with their users, namely farmers, water user organisations, irrigation authorities, they are used; where they are delivered, they are abandoned (R.67.1.22, R.67.1.54, R.67.1.61; R.67.2.02, R.67.2.17, R.67.2.18, R.67.2.23).
5. **Economic instruments make scarcity visible:** Volumetric charging, metering institutions and satellite-managed water fees change irrigation behaviour where infrastructure alone does not (R.67.1.35; R.67.2.43, R.67.2.48, R.67.2.07).
6. **Equity and smallholders remain largely unaddressed:** Available technologies are poorly matched to small and marginal farming systems, and the benefit–burden distribution of water services is rarely addressed (R.67.1.33, R.67.1.63; R.67.2.20, R.67.2.21, R.67.2.40).

The six messages compose a single reading grid, used throughout this report. Irrigation decisions. either individual or territorial, are produced along a chain that observes the system, projects its evolution, decides, acts, and accounts for the outcome (Figure 2). The contributions cover every link of this chain: observation and projection are its most mature layers, execution is emerging, and accounting is the thinnest. Around the chain stands governance, with the institutions, incentives and rules that condition every link, and the central finding of this report is that this frame, more than any single link, now determines whether water use efficiency actually improves.

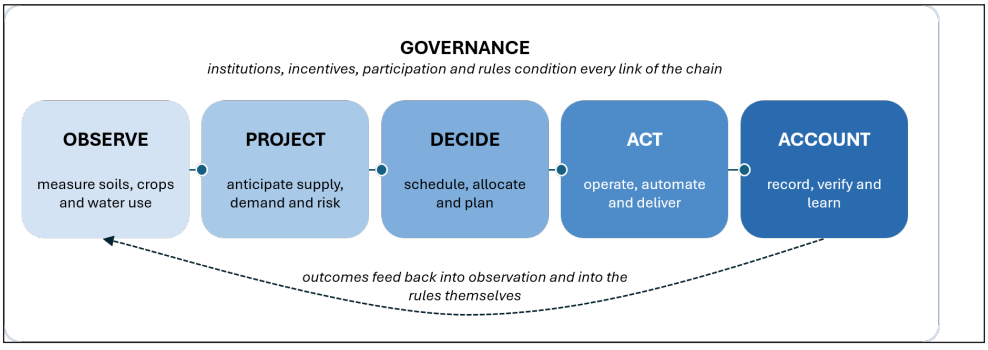

Figure 2. The five-stage decision chain emerging from the contributions, with governance as the cross-cutting frame. Whether observation changes decisions, and whether accounting changes the rules, depends on institutions, incentives and participation

3. SUB-QUESTION 67.1 - IRRIGATION PRACTICES AND TECHNOLOGIES AT THE PLOT AND FARM LEVELS: HOW CAN THESE BE EVALUATED AND IMPROVED?

Farm-level irrigation can now be evaluated with unprecedented precision at falling cost, and the documented route to improving it runs as much through prices, institutions and tools that fit farmers as through the technologies themselves.

3.1 Overview

Sixty-four papers were analysed under Sub-Question 67.1. The contributions respond to both dimensions of the mandate (i.e. evaluate and improve): a first group of papers builds the measurement and evaluation base (sensing, remote sensing, performance assessment), a second group turns measurement into decisions (scheduling tools, decision-support systems, digital platforms), a third improves the practices and the hardware themselves, and a fourth examines the human, institutional and economic conditions under which any of this is adopted.

Table 1. Thematic clusters of the contributions to Sub-Question 67.1, with their main function and the papers assigned to each.

Thematic cluster	Main function	Papers (R-numbers)	Count
A. Sensing and field metrology (soil, plant, salinity)	Makes field conditions measurable at decreasing cost	R.67.1.02, .10, .30, .33, .37, .38, .55, .60	8
B. Remote sensing and ET at plot/farm scale	Quantifies actual water consumption and productivity from space	R.67.1.01, .03, .06, .26, .31, .36, .66	7
C. Scheduling, DSS and farm-level platforms	Turns measurements and forecasts into schedules and recommendations	R.67.1.11, .13, .15, .22, .43, .46, .48, .56, .62, .67	10
D. Agronomic practices and deficit strategies	Improves the practices themselves (e.g. timing, deficit, establishment, inputs)	R.67.1.17, .19, .21, .25, .28, .39, .40, .52, .65	9
E. Conveyance, equipment and system engineering	Improves application, conveyance and control hardware and its operation	R.67.1.05, .12, .23, .27, .29, .32, .34, .41, .45, .49, .50, .63, .64	13
F. Adoption, institutions, economics and risk management at farm level	Addresses the people, incentives and institutions behind adoption	R.67.1.04, .14, .16, .18, .20, .24, .35, .42, .44, .47, .51, .53, .54, .57, .58, .59, .61	17

3.2 Evaluating: measurement as the foundation

Any evaluation of irrigation practices rests on measurement, and on this front the contributions are reassuring that measuring is becoming the easy part. At the point scale, contributions examine the conversion of sensor ion readings into saturated-extract electrical conductivity across soil textures (R.67.1.02), the behaviour and protection of low-cost capacitive moisture sensors (R.67.1.33), broadband electrical impedance spectroscopy as a physics-based route to simultaneous estimation of moisture, salinity and porosity (R.67.1.60), and a decade of operational experience with plant-based sensors (e.g. dendrometers and sap-flow) in Mediterranean orchards and vineyards, with reported water savings of 20–25% against comparable drip equipment (R.67.1.30). Sensor networks are validated against reference

methods in commercial vineyards (R.67.1.10), and one paper argues that metrology itself is the blind spot of decision chains in agricultural water management, since measurement errors propagate silently into both direct triggers and model-based decisions (R.67.1.37).

At the field and scheme scales, remote sensing carries the evaluation burden. An operational Google-Earth-Engine (GEE) implementation of SEBAL maps evapotranspiration and water productivity over 226,600 ha of the Eastern Nile Delta and identifies 41,443 ha of low-productivity land where interventions would yield the largest savings (R.67.1.01). Deep-learning super-resolution of Sentinel-2 imagery mitigates the mixed-pixel problem in small paddy plots and brings evapotranspiration (ET) estimation errors down to 0.40–0.58 mm/day against lysimeters (R.67.1.03). The OpenET framework is validated against eddy covariance and soil-moisture depletion in deficit-irrigated alfalfa, verifying consumptive-use reductions of 40–50% during summer cut-off (R.67.1.06). Earth Observation combined with smart metering spatialises hydrant-level volumes over an 80,000 ha service area in Provence (R.67.1.26); NDVI time series document dry-seeding-with-delayed-flooding trials in Portuguese rice (R.67.1.31); UAV hyperspectral imagery supports coupled water–nitrogen diagnosis in chili (R.67.1.38); and spectral, machine-learning (ML) and physical modelling are integrated for maize monitoring in Hungary (R.67.1.66). Salinity, the other face of irrigation performance, is mapped from point to field scale with locally calibrated satellite models (R.67.1.55).

Evaluation is also institutional, and one field study makes the point better than any argument. On 100 farmer-managed farms in the Jordan Valley, measured emission uniformity shows hydraulically adequate systems coexisting with systematic over- and under-irrigation, because scheduling follows experience rather than computed requirements (R.67.1.57). A meta-analysis reaches a compatible conclusion from the literature, asking bluntly whether irrigation decision-support systems are useful at all and finding improved water productivity in 57% of documented cases, probably an upper bound given publication bias (R.67.1.11). Measurement, in short, is ahead of practice, and this is a gap the rest of this report returns to repeatedly.

3.3 Improving: from measurement to decision

Decision-support and scheduling tools translate the measurement base into practice. Some of the more mature ones have moved past recommendation altogether: they execute the irrigation, record what happened and adjust the next one (R.67.1.22, .56). Operational platforms are documented at commercial scale: HIDRIX, an on-demand irrigation and fertigation management system, couples short-term forecasting of crop water needs with autonomous fertigation execution and full traceability, reporting 15.8% average irrigation reduction and 21.2% water-productivity gains across pilot farms (R.67.1.22); iFarm, a smart irrigation management platform designed to improve water use efficiency, economic performance, and climate resilience at the farm level, in Thailand combines IoT control, forecasts and satellite information across 18 pilot farms, with payback estimated at 2.27 months (R.67.1.56). Digital-twin architectures integrate hydraulic simulation, sensors and crop modelling at plot scale (R.67.1.43). Seasonal forecasts (ECMWF SEAS5) are evaluated for early estimation of crop cycles and irrigation requirements in Mediterranean maize (R.67.1.48); scheduling tools available to prairie producers are compared in rotation trials (R.67.1.46); AquaCrop-based strategies for representing water-harvesting techniques are systematised (R.67.1.62); and the Optirrig model is calibrated and validated for potato in semi-arid Tunisia, quantifying yield–quota trade-offs under limited supply (R.67.1.67). A plan for a multi-scale hydro-spatial application, IrrigAble, addresses the persistent gap between disparate data streams and usable dashboards (R.67.1.15), while surrogate modelling with physics-informed neural networks is shown to be the only architecture class that remains reliable outside the training distribution for water-reuse treatment control (R.67.1.13).

3.4 Improving: practices and equipment

A substantial group of papers improves the practices themselves. Deficit and regulated-deficit strategies are given operational form: stage-based soil-water thresholds for citrus, directly measurable with in-field sensors (R.67.1.19); contrasted irrigation regimes for grain sorghum under rain shelters (R.67.1.39); drip irrigation of maize on low-permeability clay soils, where capillary-potential thresholds are established but atmospheric drought limits attainable yields (R.67.1.25). Subsurface drip irrigation of sugarcane in Zimbabwe saves 30% of water while raising cane yield from 150 to 188 t/ha (R.67.1.17). Alternate wetting (AWD) and drying and direct-seeded rice are examined both as scaling propositions for South Asia (R.67.1.65) and, critically, through the structural barriers that block AWD in gravity-fed systems, where collective decision authority is mismatched with individual incentives (R.67.1.58). Precision application of livestock effluents through linear-move systems (R.67.1.21), a fruit-waste-based superabsorbent polymer tested on wheat, tomato and okra (R.67.1.40), and greenhouse-gas accounting of the rice–wheat system of Punjab (R.67.1.28) complete the agronomic picture. At the interface between agronomy and system design, a coupled hydraulic–soil–crop model quantifies how drip hydraulic uniformity interacts with initial soil-salinity variability at the subunit level, recommending a design uniformity of 83% under severe salinity (R.67.1.52).

Equipment and conveyance engineering remain a vigorous field, spanning the full delivery chain: self-flushing anti-clogging emitters for sediment-laden water (R.67.1.45); a high-precision integrated measurement-and-control gate with ultrasonic layered velocimetry and ±2% flow error (R.67.1.49); computer-vision assessment of vegetation blockage in channels (R.67.1.50); UAV orthoimagery for updating canal geospatial inventories (R.67.1.29); optimisation of rotational irrigation in Taiwan's Houli canal system (R.67.1.12) and of pressure regulation in pressurised networks (R.67.1.34); coupled macroscopic–hydrodynamic scheduling that solves the "volume satisfied but level insufficient" problem (R.67.1.23); simulation-based multi-objective gate operation in a Korean district (R.67.1.32); IoT-supported redesign of gravity surface irrigation in the Crau (R.67.1.64); underground pipelines for local distribution in Punjab and Gujarat (R.67.1.63); large-scale watercourse lining, laser levelling and solar drip programmes in Pakistani Punjab, with conveyance efficiency raised from 49% to 68% (R.67.1.05); canal automation in India's NLBC modernisation (R.67.1.41); and a plug-and-play irrigation management system built on hydraulic digital twins, reporting 10–25% water savings (R.67.1.27). A pattern runs through the list: the largest reported gains come where hardware is paired with measurement and a supportive institutional context, the lining programmes deployed alongside laser levelling and monitoring (R.67.1.05), the digital twins behind the plug-and-play system (R.67.1.27), and the pipelines of Punjab and Gujarat, whose contrasting fortunes owe more to institutions than to engineering (R.67.1.63), rather than from hardware alone.

3.5 The conditions of adoption

The final theme concerns the people and institutions who decide. Volumetric water charging in two exceptional Japanese districts reduces annual water use by roughly 20–40%, with the strongest effects at peak demand and among larger farms (R.67.1.35). National and multi-scale reviews trace adoption status, barriers and roadmaps in Malaysia (R.67.1.42) and Nepal, where the "data-to-decision gap" is identified as the binding constraint (R.67.1.44); digital-twin irrigation districts are surveyed as China's emerging management paradigm (R.67.1.47); groundwater management information systems in Pakistani Punjab are presented as governance enablers for the Punjab Water Act (R.67.1.59). Participatory structures are documented from the Marun-Jarahi basin in Iran, where county-level co-decision on cropping plans and releases improved efficiency and trust after the 2021 drought (R.67.1.54), from Taiwanese irrigation areas (R.67.1.24), and from a Philippine river irrigation system where MASSCOTE-based diagnosis with farmers surfaced both openness to AWD and the social

tolerance of unauthorised offtakes (R.67.1.61). Success conditions for connected technologies in collective networks are shown to depend less on the technology than on its insertion into coherent socio-technical strategies (R.67.1.14). Climate-smart technology portfolios are reviewed for resilient agriculture (R.67.1.04), whether modernization can offset climate-driven demand growth is tested for Türkiye, with the warning that field-scale savings are not basin-scale savings without allocation management (R.67.1.16), and typhoon-induced multi-crop loss prediction (R.67.1.20), drought-index lag analysis (R.67.1.18), ML-plus-system-dynamics reservoir operation (R.67.1.53) and watershed-scale paddy water balance (R.67.1.51) extend farm-level decision-making toward risk and drought management.

3.6 Answering Sub-Question 67.1

How can plot- and farm-level practices and technologies be evaluated and improved? On the evidence of these contributions, evaluation is no longer the constraint: soil, plant and salinity states can be measured in the field at decreasing cost (R.67.1.02, .30, .33, .60), evapotranspiration and water productivity can be quantified from space at the scale of individual plots (R.67.1.01, .03, .06), and the performance of both practices and decision-support tools can itself be audited (R.67.1.11, .57). Improvement follows two documented routes: quantified interventions, namely deficit thresholds, subsurface drip, conveyance modernization, precision equipment, whose water and yield effects are quantified across many of the papers; and, decisively, interventions on the decision environment itself, since the papers converge on the finding that individual skills and objectives evoked by the sub-question respond to prices (R.67.1.35), to collective arrangements (R.67.1.54, .58, .61) and to the fit between tools and real farming systems (R.67.1.14, .44) at least as much as to the technologies made available.

4. SUB-QUESTION 67.2 — AT THE TERRITORIAL SCALE, HOW CAN THE DECISION-MAKING PROCESS BE EXPLAINED AND IMPROVED?

Territorial decisions are explained by the interplay of agricultural, economic, environmental and regulatory drivers, and are improved where shared data infrastructures, allocation mechanisms and participatory arrangements advance together.

4.1 Overview

Fifty-three papers were received under Sub-Question 67.2. The contributions respond to both dimensions of the mandate (i.e. explain and improve) and divide naturally along them. A first group of contributions explains the territorial decision context: the trajectories of the resource under climate change, the actual patterns of demand and use, and the actors and institutions whose interplay produces decisions. A second group improves the decision process itself: through decision-support platforms and digital infrastructure, through allocation mechanisms and economic instruments, and through enabling infrastructure.

4.2 Explaining the decision context

4.2.1 The resource and its trajectories

Territorial decisions start from projections of the resource. Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)-driven hydrological modelling projects runoff shifts in the Mae Klong basin of Thailand, with wetter late rainy seasons and drier dry seasons (R.67.2.03) and documents a statistically significant long-term decline of precipitation and per-capita availability, from about 1,500 m³ in 1962 to below 450 m³, in Algeria (R.67.2.10). Drought-stage segmentation with XGBoost (Extreme Gradient Boosting) prediction supports staged reservoir response in monsoon Korea (R.67.2.05); bivariate regional frequency analysis

provides design rainfall for agricultural drainage in Korea (R.67.2.41); satellite-precipitation bias correction improves monsoon representation in the Phetchaburi basin (R.67.2.35); and long-term remote-sensing trend analysis tracks hydro-climatic and land-use change in the transboundary Kok basin, including heavy-metal contamination (R.67.2.29). Risk is also structural: coastal flood modelling coupled with water-quality data quantifies flood-induced salinity risk in Indonesian coastal irrigation (R.67.2.12); coupled drainage simulation and gate–pump scheduling reduces waterlogging exceedance in China's plain river networks (R.67.2.14); and repurposing boreal drainage infrastructure with harvesting reservoirs is optimised for emerging Nordic droughts (R.67.2.44).

Table 2. Thematic clusters of the contributions to Sub-Question 67.2, with their main function and the papers assigned to each.

Thematic Cluster	Main function	Papers (R-numbers)	Count
A. Understanding The Resource And Its Trajectories	Projects availability, drought and flood risk under climate change	R.67.2.03, .05, .10, .12, .14, .29, .35, .41, .44	9
B. Observing Demand And Use (Eo, Water Accounting)	Makes territorial water demand and consumption visible	R.67.2.19, .31, .33, .36, .42, .45, .50, .51	8
C. Understanding Actors And Institutions	Explains why territorial decisions are what they are	R.67.2.06, .08, .13, .20, .21, .27, .28, .37, .40	9
D. Decision-Support Platforms And Digital Infrastructure	Gives all actors a shared, operational picture of the resource	R.67.2.01, .02, .09, .11, .17, .18, .22, .23, .25, .32, .39, .53	12
E. Allocation Mechanisms And Economic Instruments	Transmits scarcity to decisions through rules, prices and fees	R.67.2.04, .07, .16, .26, .30, .34, .43, .47, .48, .52	10
F. Infrastructure As An Enabler	Expands what territorial decisions can physically achieve	R.67.2.15, .24, .38, .46, .49	5

4.2.2 Observing demand and use

A second precondition of territorial decision-making is knowing what is actually irrigated and consumed. AI delineation of paddy fields from high-resolution ortho-imagery feeds water-demand estimation in Taiwan (R.67.2.19); an open-data approach (CAWET) estimates territorial irrigation demand for lavender in southern France (R.67.2.42); multi-source mapping links soil water and carbon from plot to watershed in Mediterranean perennial crops (R.67.2.31); remote sensing monitors the technical condition of drained lands (R.67.2.33); MODIS-based evapotranspiration yields regional water-use-efficiency coefficients of 0.35–0.72 on the Lower Volga (R.67.2.45); CNN-based (Convolutional Neural Network) ET forecasting reaches R^2 = 0.90 at a Pakistani research farm (R.67.2.36); a two-decade evolution of remote sensing in Thailand culminates in nationwide Water Accounting Plus across 25 basins (R.67.2.50); and economic water productivity is assessed across Thailand's 22 basins, showing that increased dry-season allocation does not automatically increase economic productivity (R.67.2.51).

4.2.3 Actors, institutions and the anatomy of decisions

The papers under this cluster are rich in explanations of why territorial decisions are what they are. The Crau case dissects nested scales and institutional fragmentation in a hydrosystem where gravity irrigation provides 70% of aquifer recharge, so that "inefficient" irrigation sustains drinking water for 300,000 people (R.67.2.08). Interview-based analysis in California shows that available sensing technologies are structurally mismatched with small-farm systems

(R.67.2.20). Japanese land-improvement districts are shown to carry unrecognised flood-regulation burdens as ecosystem services of irrigation canals under urbanisation (R.67.2.21). Multi-scale reviews of Malaysian irrigation governance identify institutional fragmentation and weak data interoperability as binding constraints (R.67.2.27). Conceptual contributions reframe IMT/PIM (Irrigation Management Transfer/Participatory Irrigation Management) towards basin-scale, polycentric governance and warn about the rebound effect of efficiency gains (R.67.2.37) and propose explainable-AI architectures to bridge the "crisis of decidability" between analysis and action (R.67.2.28). Stakeholder-oriented economic analysis is presented as a design tool for agroecological and irrigation transition projects (R.67.2.06); cluster-matrix tools frame strategic planning of irrigated interfluves (R.67.2.13); and smallholder irrigation is documented as de-facto social security in Zimbabwe's Chivi district (R.67.2.40).

4.3 Improving the decision process

4.3.1 Platforms and digital decision infrastructure

The largest group of contributions builds territorial decision-support systems. Basin-scale hydrological simulators support anticipatory drought governance with six-month horizons (WatSim, R.67.2.01). The co-created IPON (Irrigation Performante de l'Office du Niger) tool computes eleven irrigation-performance indicators for the 142,000 ha Office du Niger from WaPOR and delivery data, with documented institutional ownership, "trust-building before tool-building" (R.67.2.02). National platforms integrate AI, IoT and digital twins at very large scale in India (R.67.2.09); machine learning estimates field-scale soil moisture across Europe without in-situ sensors on every field (Soil Vision, R.67.2.11); a geospatial application supports national irrigation planning in Rwanda under data constraints (R.67.2.17); a web platform bridges water accounting and the WEFE nexus with participatory scenario simulation in Morocco (R.67.2.18); smart water networks with 68,000 delivery points deploy smart metering, digital twins and AI in Provence (REImu, R.67.2.22); physics-informed machine learning resolves morphodynamic conflicts in an Indonesian basin through a shared digital twin (R.67.2.32); AI and data governance are combined in Saudi Arabia's national irrigation database and irrigation calculator in 29 cities (R.67.2.39); Earth-Observation product portfolios serve multi-level decisions from plot to basin in Italy (R.67.2.53); adaptive AI-driven frameworks are designed for wetland–agriculture systems (R.67.2.25); and a synthesis review of remote sensing for irrigation management identifies co-creation deficits as the main adoption barrier (R.67.2.23).

4.3.2 Allocation mechanisms and economic instruments

The second lever is allocation. Modelling of metering institutions in South Africa shows that only direct volumetric metering makes the shadow value of water explicit and shifts irrigators from area reduction to deficit irrigation (R.67.2.43). Four modes of social-capital participation (i.e. concession operation, "farmland irrigation+", water-rights trading and green finance) are analysed in Chinese modern irrigation districts (R.67.2.07). Multi-objective optimisation coordinates water and cropping structure in a Sichuan district (R.67.2.30) and water–land regulation strategies are derived for the Yellow River basin from a WEEF (water-ecology-energy-food) system-dynamics analysis (R.67.2.26) and from climate-resilience diagnostics (R.67.2.34). Satellite-managed water fees improve identification of users and fee recovery in the Senegal valley (MOSIS, R.67.2.48); a proactive water-sobriety policy on the Carpentras canal is reviewed as a lever for territorial reallocation, together with its limits under climate change (R.67.2.52); territorial life-cycle assessment compares infrastructure and diversification scenarios in Provence on eco-efficiency grounds (R.67.2.04); modernisation of the Hetao Irrigation District of the Yellow River Basin is read as a transition with explicit trade-offs between water saving, cash-crop expansion and salinisation risk (R.67.2.16); and an integrated irrigation-reform diagnosis for a Malaysian granary with 17% efficiency derives hydrologically triggered allocation rules (R.67.2.47).

4.3.3 Infrastructure as an enabler

Territorial decisions are ultimately constrained by physical systems. Geosynthetic cementitious composite mats rehabilitate canals within days, with a documented 96% seepage reduction in California and winter installation in Hungary (R.67.2.15); water-saving rice strategies are simulated with QGIS-SWAP-Paddy (a spatialized version of SWAP model, integrated with a module simulating channel-network percolation) and coupled to MODFLOW-6 in Italy's Lomellina, where alternate wetting and drying promotes earlier groundwater recharge while easing peak demand (R.67.2.24); photovoltaic canal covers in Iran are shown to largely cut evaporation while generating power, with a 10.7-year payback (R.67.2.38); recharge-basin development converts purchased farmland into groundwater storage under SGMA (Sustainable Groundwater Management Act of 2014) in California (R.67.2.46); and UAV-based aerial survey coupled with HEC-RAS hydraulic modelling provides rapid hydraulic assessment of a 26 km Indian canal, locating severe aggradation and overtopping risk (R.67.2.49).

4.4 Answering Sub-Question 67.2

How can the territorial decision-making process be explained and improved? On this question, the picture that emerges is of a process shaped by four drivers: agricultural drivers (cropping structures and their water demand, R.67.2.19, .30, .42), economic drivers (water pricing, fee recovery, productivity differentials, R.67.2.43, .48, .51), environmental drivers (climate trajectories, salinity, recharge and ecosystem functions, R.67.2.03, .08, .10, .12, .21), and regulatory drivers (allocation rules, institutional mandates and their fragmentation, R.67.2.27, .37, .46, .47). It improves the process along three complementary levers that the papers document with operational evidence: shared and trusted information infrastructures that give all actors the same picture of the resource (R.67.2.01, .02, .18, .22, .50, .53); allocation and economic mechanisms that transmit scarcity to decisions (R.67.2.07, .43, .48, .52); and participatory arrangements that convert information into accepted decisions (R.67.2.02, .18, .23). The contributions that combine all three levers are precisely those reporting sustained institutional uptake.

5. CONVERGENCES AND TRADE-OFFS

5.1 Convergences

Three convergences cross the two sub-questions can be dervide.

- **First,** Earth Observation has completed its transition from research to operations: the same WaPOR, Sentinel, Landsat and OpenET product families appear in farm-scale scheduling and in national water accounting alike.
- **Second,** co-creation, as the joint design of tools and rules with their end users from the outset, rather than their transfer after development, is repeatedly identified, independently, on four continents, as the decisive adoption factor (R.67.1.22, R.67.1.54, R.67.1.61; R.67.2.02, R.67.2.17, R.67.2.18, R.67.2.23).
- **Third,** anticipation is replacing reaction as the organising principle of water management, from weekly ET forecasts to six-month drought horizons.

The convergence is structural as much as thematic: both sub-questions describe the decision chain of Figure 2, read at two scales. What the farm observes in soils and plants, the territory observes in irrigated areas and aquifers; farm-level scheduling has its counterpart in allocation and planning, automated field control in reservoir and network operations, and the irrigator's traceable records in territorial water accounting, fee recovery and audits. Governance conditions every stage at both scales, from collective delivery rules to allocation and data policy.

5.2 Trade-offs

Papers from both sub-questions demonstrate, with data, that efficiency gains at one scale do not automatically materialise at the next: field-scale savings diminish at basin scale without allocation management (R.67.1.16), technically adequate micro-irrigation coexists with mis-scheduling (R.67.1.57), efficiency gains can rebound into expanded demand (R.67.2.37, R.67.2.16), and metering regimes (not emitters) determine whether scarcity reaches the irrigator's objective function (R.67.2.43, R.67.1.35).

A second one concerns who is served: the technology offer is calibrated on well-resourced farms, while small and marginal systems remain outside its design assumptions (R.67.2.20, R.67.1.33, R.67.1.63).

5.3 From enabling to transformative innovation

The contributions can be placed on a four-level scale that distinguishes novelty from transformation. The classification proposed below is a 'reading device' not a judgement of individual papers.

Table 3. A four-level scale of the innovations presented, from enabling to transformative. The classification is proposed as a reading device, not as a judgement of individual papers.

Level	Characteristics	Examples from the papers
1. Enabling	Improves measurement or a single technical component	R.67.1.33, .45, .49, .60; R.67.2.36, .41
2. Integrated	Combines several information streams into decision support	R.67.1.15, .43, .48; R.67.2.11, .18
3. Operational	Changes real-time management or executes decisions	R.67.1.22, .27, .56; R.67.2.01, .22
4. Transformative (institutional)	Changes who decide, how water is allocated or how performance is verified	R.67.1.35, .54; R.67.2.02, .07, .43, .48

The scale is not a ranking of technical sophistication. A sophisticated tool remains an enabling innovation if it never reaches a real decision, while a comparatively simple institutional change, such as a volumetric tariff or a co-decided cropping plan, can be transformative if it durably changes water-use behaviour.

6. CONCLUDING REMARKS

Where do we stand? On the evidence of these contributions: observation and prediction have become operational infrastructure; the decision-support layer is being built at every scale, from the field to the nation; and the binding constraint on water use efficiency has shifted from measurement to governance, to the institutions, incentives and relationships that determine whether what is measured changes what is decided.

Sub-Question 67.1 shows that farm-level practice can now be evaluated with unprecedented precision and improved with documented, quantified interventions. Sub-Question 67.2 shows that territorial decision-making can be explained, and, therefore, improved, when data infrastructures, allocation mechanisms and participatory arrangements advance together. The direction the papers point to is consistent: technology and institutions designed together, tools built with their users, and management that anticipates rather than reacts.

Four questions run through the papers without ever being answered: who pays, who owns the data, what happens when the technology fails, and who is served. Together with the trade-offs of Section 5, the following directions emerge:

1. **Report efficiency claims at more than one scale:** Several contributions show that plot-level savings do not equal basin-level savings; papers claiming water savings should state the scale of the claim and, where possible, the end of the "saved" water (R.67.1.16; R.67.2.16, .37, .43).
2. **Design for adoption from the outset:** Too often, tools are first developed on technical criteria and only afterwards disseminated to farmers and water managers through training and demonstrations. The papers show that this sequence rarely works: sustained uptake is reported where end users help shape the tool from the start, deciding what it should do and how it fits their actual decisions, and adoption fails where they are only trained on a finished product (R.67.1.22, .54, .61; R.67.2.02, .17, .18, .23).
3. **Pair every digital platform with an institutional and financial sustainability plan:** The long-term operation of the many platforms presented (data continuity, maintenance, staffing beyond the project phase) is the least documented dimension of the papers. Contributions that integrate economic analysis, such as R.67.1.56 with explicit payback and adoption-rate figures, show that it can be done.
4. **Settle data ownership and interoperability early:** As irrigation becomes data-intensive, who owns the data, who maintains access to it and how systems talk to each other determine whether platforms outlive their projects. Weak interoperability is already identified as a binding constraint on governance (R.67.2.27), and national data-governance arrangements are only beginning to emerge (R.67.2.39).
5. **Plan for failure as well as for performance:** Automated irrigation and AI-assisted allocation need fallback procedures, clear override responsibilities and honest communication of uncertainty. The abstracts leave these questions almost untouched.
6. **Pay attention to measurement quality:** Decision tools are only as good as the data that feed them, yet measurement accuracy is rarely checked or reported; errors propagate silently into every downstream decision. Standards and routine error reporting deserve explicit attention (R.67.1.33, .37, .57).
7. **Design for smallholders, not only for well-equipped farms:** Available irrigation technologies are largely calibrated on well-resourced farming systems; small and marginal farms should be brought inside the design assumptions from the start, rather than being expected to adapt to tools built for others (R.67.1.63; R.67.2.20, .40).
8. **Value all the services that irrigation water provides:** Irrigation infrastructure often delivers services beyond crop production (aquifer recharge, flood regulation, ecosystem support). Territorial allocation debates should assess "efficiency" against this full set of functions, not against crop water use/productivity alone (R.67.2.08, .21, .24, .46).

If the contributions point to one destination, it is accountability: an irrigation sector able to state what water was available, how it was used, why decisions were taken, and what should change next time.

ACKNOWLEDGEMENTS

The General Reporter gratefully acknowledges the authors of the 117 contributions analysed under Question 67, whose work forms the substance of this report; the members of the Panel of Experts, for their support in reviewing the submissions and shaping the analysis; and the ICID Central Office, for its assistance with communications and the timely transmission of all documents.

QUESTION 67:

TECHNOLOGIES ET PRATIQUES INNOVANTES POUR ACCROÎTRE L'EFFICACITÉ DE L'UTILISATION DE L'EAU : GESTION ET SERVICES D'IRRIGATION, TÉLÉDÉTECTION, MATÉRIEL D'IRRIGATION,... OÙ EN SOMMES-NOUS ?

RAPPORT GÉNÉRAL

Rapporteur Général
Maher Salman (FAO)*

1. INTRODUCTION

La Question 67 fait le point sur la situation de l'irrigation à l'égard des technologies et des pratiques innovantes visant à accroître l'efficacité de l'utilisation de l'eau en ce qui concerne la gestion et les services d'irrigation, la télédétection et les équipements d'irrigation. Cette Question s'articule autour de deux échelles complémentaires. La sous-question 67.1 porte sur les parcelles et les exploitations agricoles, où les pratiques et technologies d'irrigation reflètent les compétences, les objectifs et les décisions individuels, et examine la manière dont ceux-ci peuvent être évalués et améliorés. La sous-question 67.2 traite l'échelle territoriale, où la gestion de l'eau d'irrigation est influencée conjointement par des facteurs agricoles, économiques, environnementaux et réglementaires, et cherche à comprendre la manière dont le processus de prise de décision peut être expliqué et amélioré.

Les deux sous-questions, par conséquent, tracent une trajectoire unique, de la prise de décision individuelle au niveau de la parcelle jusqu'à la prise de décision collective à l'échelle du périmètre irrigué, du bassin versant et du pays. Les 117 contributions analysées pour ce rapport (64 sous Q.67.1 et 53 sous Q.67.2), provenant d'auteurs et de zones d'étude répartis dans au moins 35 pays (Figure 1), permettent d'apporter une réponse complète à la question « où en sommes-nous? » posée au titre de la Question. L'ensemble de ces travaux révèle une discipline en pleine transition : des outils d'observation qui étaient expérimentaux il y a dix ans constituent désormais des infrastructures opérationnelles, tandis que les contraintes majeures pesant sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau sont de plus en plus d'ordre institutionnel, économique et humain, plutôt que purement technique.

Ce rapport suit la structure de la Question. La section 2 offre un portrait quantitatif des contributions. La section 3 présente la réponse à la sous-question 67.1 et la section 4 celle à la sous-question 67.2 ; dans les deux cas, le contenu est organisé selon les thèmes analytiques qui se dégagent des documents plutôt que par document. Chaque contribution est citée par son numéro R au moins une fois. La section 5 propose une lecture transversale : convergences, compromis et analyse à quatre niveaux des innovations présentées; et la section 6 se conclut par une réponse synthétique à la question posée ainsi que par les recommandations faites qui en découlent.

* Senior Land & Water Officer | Agricultural Water Management Team Lead, Adaptation Fund Unit Coordinator, Land and Water Division (NSL) | FAO-UN, Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy, Tel: +39 06 570 54718, E-mail: Maher.Salman@fao.org

117 Rapports Analysés | 35 Pays Avec Des Zones D'étude Cartographiées | 101 Sites D'étude Sur La Carte

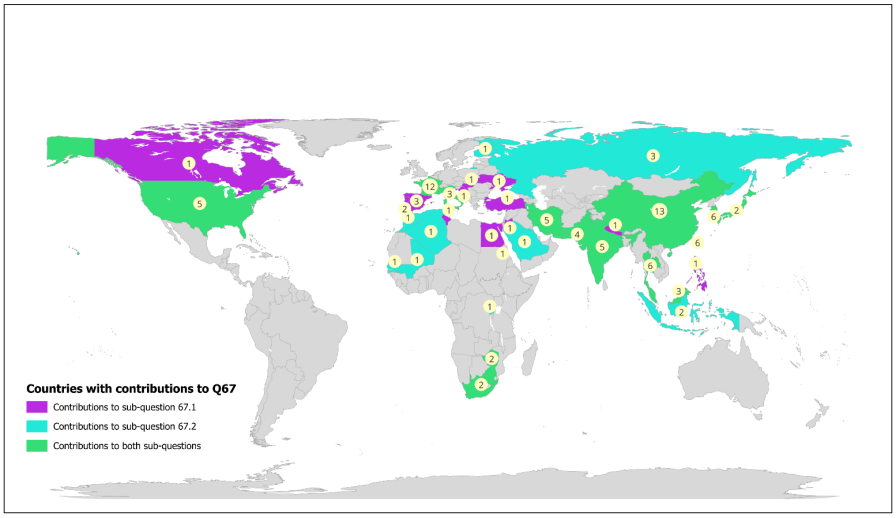

Figure 1. Répartition géographique des contributions à la question 67. Les pays sont indiqués en grisé par couverture : contributions à la sous-question 67.1 (12 pays), à la sous-question 67.2 (9) ou aux deux (14). Les chiffres indiquent le nombre d'études menées dans chaque pays. Les contributions de portée mondiale, multirégionale ou conceptuelle ne sont pas représentées sur la carte. La représentation se fait au niveau du pays; les zones d'étude sont sous-nationales et sont décrites dans le texte.

2. PORTRAIT DES CONTRIBUTIONS

Les contributions couvrent un large éventail géographique et méthodologique. Elles proviennent d'Europe (avec une forte présence du pays hôte, la France, notamment concernant les services d'eau à l'échelle territoriale et l'observation de la Terre), d'Asie orientale, du Sud-Est et du Sud (Chine, Thaïlande, Taïwan, Corée, Japon, Malaisie, Indonésie, Inde, Pakistan, Népal, Bangladesh), du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord (Iran, Jordanie, Arabie saoudite, Algérie, Maroc, Tunisie, Turquie, Égypte), d'Afrique subsaharienne (Mali, Sénégal, Rwanda, Zimbabwe, Afrique du Sud) et des Amériques (États-Unis, Canada).

Sur le plan méthodologique, la caractéristique la plus visible dans l'ensemble des documents est la maturité de l'observation de la Terre et des approches fondées sur les données : environ la moitié de toutes les contributions reposent sur l'observation par satellite ou par véhicule aérien sans pilote (UAV), et des composants d'apprentissage automatique apparaissent dans les deux sous-questions, allant de l'estimation de l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle et de la récupération de l'humidité du sol jusqu'à la prédiction du stockage en réservoirs, à l'estimation des pertes dues aux inondations et à la comptabilité de l'eau à l'échelle du bassin. Il est à noter que les algorithmes d'apprentissage automatique ont tendance à se substituer de plus en plus aux algorithmes basés sur des données physiques, qui sont la norme depuis de nombreuses années. Cependant, les analyses comparatives des deux approches sont absentes, ainsi que des réflexions sur la transmissibilité des approches d'apprentissage automatique dans différents contextes et même dans différentes périodes

au sein du même domaine d'étude, contrairement aux approches basées sur la physique qui sont transmissibles par définition.

Une deuxième caractéristique, tout aussi importante, réside dans l'importance de l'analyse institutionnelle, économique et sociale, qui ne se limite plus à une catégorie résiduelle mais constitue un ensemble cohérent de preuves dans les deux sous-questions.

La répartition géographique présentée à la figure 1 nécessite deux remarques de lecture. La forte présence française reflète essentiellement celle du pays hôte et ne doit pas être interprétée comme un choix thématique délibéré. Plus fondamentalement, les priorités régionales diffèrent selon les éléments de preuve : l'intégration et la modernisation des services d'eau dominent en Europe, l'adoption au sein des systèmes rizicoles collectifs en Asie du Sud et du Sud-Est; la pénurie, le stress hydrique et la salinité au Moyen-Orient et en Afrique du Nord, et les informations opérationnelles dans de grands systèmes d'Afrique subsaharienne confrontés à un manque de données. Des technologies similaires apparaissent dans toutes les régions, mais les résultats décrits dépendent fortement du contexte dans lequel elles sont appliquées.

2.1 Vue d'ensemble des messages clés

Six messages résument les contributions; chacun est développé dans le corps du rapport.

1. Observation en tant qu'une infrastructure : la surveillance par satellite de l'évapotranspiration, des surfaces irriguées et de la productivité de l'eau est désormais opérationnelle à l'échelle de l'exploitation agricole et du territoire, et et non plus expérimental (par ex. R.67.1.01, R.67.1.06, R.67.1.26 ; R.67.2.02, R.67.2.48, R.67.2.50, R.67.2.53).
2. Evolution de la gestion d'une approche réactive à une approche proactive : la prévision (saisonnière, sub-saisonnière et liée à des événements spécifiques) s'intègre dans les chaînes de décision opérationnelles à toutes les échelles (R.67.1.48, R.67.1.53, R.67.1.18 ; R.67.2.01, R.67.2.05, R.67.2.03).
3. Technologie à elle seule ne permet pas d'économiser l'eau : Dans l'absence d'institutions, d'incitations et de gestion des allocations qui transmettent la rareté aux utilisateurs, les gains d'efficacité sur le terrain ne se traduisent pas par des économies à l'échelle du bassin (R.67.1.11, R.67.1.16, R.67.1.57, R.67.1.58, R.67.1.63 ; R.67.2.16, R.67.2.20, R.67.2.37, R.67.2.43).
4. Co-création et instauration de la confiance favorisent l'adoption : lorsque les outils sont conçus en concertation avec leurs utilisateurs, à savoir les agriculteurs, les associations d'usagers de l'eau et les autorités chargées de l'irrigation, ils sont efficacement utilisés; lorsqu'ils sont simplement fournis, ils sont abandonnés (R.67.1.22, R.67.1.54, R.67.1.61 ; R.67.2.02, R.67.2.17, R.67.2.18, R.67.2.23).
5. Instruments économiques rendent la pénurie visible : la tarification volumétrique, les institutions de comptage et la tarification de l'eau d'irrigation gérées par satellite modifient les pratiques d'irrigation là où les infrastructures seules échouent à le faire (R.67.1.35 ; R.67.2.43, R.67.2.48, R.67.2.07).
6. Questions d'équité et situation des petits exploitants restent largement négligées : les technologies disponibles sont mal adaptées aux systèmes agricoles de petite taille ou marginaux, et la répartition des avantages et des charges liés aux services d'eau est rarement prise en compte (R.67.1.33, R.67.1.63 ; R.67.2.20, R.67.2.21, R.67.2.40).

Ces six messages constituent une grille de lecture unique, utilisée tout au long du rapport. Les décisions en matière d'irrigation — qu'elles soient individuelles ou territoriales — sont prises le long d'une chaîne qui observe le système, projette son évolution, décide, agit et rend compte du résultat (Figure 2). Les contributions couvrent tous les maillons de cette chaîne : l'observation et la projection sont ses strates les plus murîes, l'exécution émerge, et la comptabilité est la plus fine. Autour de la chaîne se trouve la gouvernance, avec les institutions, les incitations et les règles qui conditionnent chaque maillon, et la conclusion centrale de ce rapport est que ce cadre, plus que n'importe quel maillon unique, détermine désormais si l'efficacité de l'utilisation de l'eau s'améliore réellement.

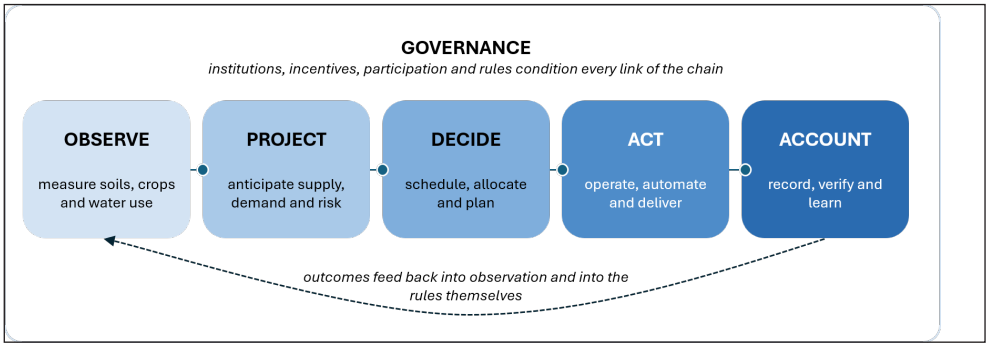

Figure 2. La chaîne de décision en cinq étapes émergeant des contributions, avec la gouvernance comme cadre transversal. La capacité de l'observation à modifier les décisions et celle de la comptabilisation à changer les règles dépendent des institutions, des incitations et de la participation.**

3. SUB-QUESTION 67.1 - LES PRATIQUES ET TECHNOLOGIES D'IRRIGATION À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE ET DE L'EXPLOITATION AGRICOLE : COMMENT PEUT-ON LES ÉVALUER ET LES AMÉLIORER?

L'irrigation à l'échelle de l'exploitation peut désormais être évaluée avec une précision sans précédent et à moindre coût; la voie documentée pour l'améliorer passe autant par les prix, les institutions et les outils adaptés aux agriculteurs que par les technologies elles-mêmes.

3.1 Vue d'ensemble

Soixante-quatre documents ont été analysés dans le cadre de la sous-question 67.1. Les contributions répondent aux deux dimensions du mandat (c'est-à-dire l'évaluation et l'amélioration) : premier groupe d'articles établit les bases de la mesure et de l'évaluation (détection, télédétection, évaluation des performances); un deuxième groupe transforme ces mesures en décisions (outils de programmation, systèmes d'aide à la décision, plateformes numériques); un troisième groupe vise à améliorer les pratiques et les matériaux eux-mêmes; enfin, un quatrième groupe examine les conditions humaines, institutionnelles et économiques favorisant l'adoption de ces solutions.

Tableau 1. *Regroupements thématiques des contributions à la sous-question 67.1, avec leur fonction principale et les articles y associés*

Regroupement thématique	Fonction principale	Articles (Numéro R)	Compte
A. Détection et métrologie de terrain (sol, plante, salinité)	Rend les conditions de terrain mesurables à moindre coût	R.67.1.02, .10, .30, .33, .37, .38, .55, .60	8
B. Télédétection et évapo-transpiration (ET) à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation	Quantification de la consommation réelle d'eau et la productivité spatiale	R.67.1.01, .03, .06, .26, .31, .36, .66	7
C. Programmation, systèmes d'aide à la décision (DSS) et plateformes pour l'exploitation	Transformation des mesures et prévisions en planification d'irrigation et recommandations	R.67.1.11, .13, .15, .22, .43, .46, .48, .56, .62, .67	10
D. Pratiques agronomiques et stratégies de déficit hydrique	Amélioration des pratiques elles-mêmes (ex. : calendrier, déficit, établissement, intrants)	R.67.1.17, .19, .21, .25, .28, .39, .40, .52, .65	9
E. Transport de l'eau, équipe-ments et ingénierie des systèmes	Amélioration du matériel d'application, de transport et de régulation, ainsi que son fonctionnement	R.67.1.05, .12, .23, .27, .29, .32, .34, .41, .45, .49, .50, .63, .64	13
F. Adoption, institutions, économie et gestion des risques à l'échelle de l'exploitation	Traitement des aspects humains, des incitations et des institutions liés à l'adoption	R.67.1.04, .14, .16, .18, .20, .24, .35, .42, .44, .47, .51, .53, .54, .57, .58, .59, .61	17

3.2 Évaluation : la mesure comme fondement

Toute évaluation des pratiques d'irrigation repose sur la mesure; à cet égard, les contributions sont rassurantes quant au fait que la mesure devient l'aspect le plus aisé de la démarche. À l'échelle ponctuelle, les travaux examinent la conversion des mesures ioniques des capteurs en conductivité électrique de l'extrait saturé selon la texture du sol (R.67.1.02); le comportement et la protection de capteurs capacitifs d'humidité à faible coût (R.67.1.33), la spectroscopie d'impédance électrique à large bande comme méthode physique permettant d'estimer simultanément l'humidité, la salinité et la porosité (R.67.1.60), ainsi qu'une décennie d'expérience opérationnelle avec des capteurs installés sur les plantes (ex. : dendromètres et mesures de flux de sève) dans les vergers et vignobles méditerranéens, avec des économies d'eau rapportées de 20 à 25% par rapport à un équipement d'irrigation goutte-à-goutte (R.67.1.30). Les réseaux de capteurs sont validés par rapport aux méthodes de référence dans les vignobles commerciaux (R.67.1.10), et un article soutient que la métrologie elle-même consitue l'angle mort des chaînes de décision dans la gestion de l'eau agricole, car les erreurs de mesure se propagent silencieusement à la fois dans les déclencheurs directs et les décisions fondées sur des modèles (R.67.1.37).

A l'échelle de la parcelle et du périmètre irrigué, la télédétection porte les charges de l'évaluation. Une mise en œuvre opérationnelle de l'algorithme SEBAL via Google Earth Engine (GEE) permet de cartographier l'évapotranspiration et la productivité de l'eau sur 226 600 hectares de terre à l'est du delta du Nil et d'identifier 41 443 hectares de terres à faible productivité où des interventions généreraient les économies les plus importantes (R.67.1.01). L'application de techniques de super-résolution par apprentissage profond de l'imagerie Sentinel-2 permet d'atténuer le problème des pixels mixtes dans les petites parcelles de riziculture et de réduire les erreurs d'estimation de l'évapotranspiration (ET) à 0,40 à 0,58 mm/jour par rapport aux mesures lysimétriques (R.67.1.03). Le cadre OpenET est validé par rapport à la covariance de tourbillon et à l'épuisement de l'humidité du sol dans la culture de luzerne soumise à une irrigation déficitaire, vérifiant des réductions de consommation d'eau de 40-50% pendant l'arrêt de l'irrigation estivale (R.67.1.06). L'observation de la Terre, combinée à des compteurs intelligents, permet de spatialiser les volumes distribués au niveau des prises d'eau sur une zone desservie de 80 000 hectares de terre en Provence (R.67.1.26); les séries chronologiques d'indice NDVI documentent des essais de semis à sec avec la mise en eau différée dans des rizières portugaises (R.67.1.31); l'imagerie hyperspectrale par drone facilite un diagnostic couplé eau-azote pour la culture du piment (R.67.1.38); et la modélisation spectrale, l'apprentissage automatique (AM) et physique est intégrée pour la surveillance du maïs en Hongrie (R.67.1.66). La salinité, autre facette de la performance de l'irrigation, est cartographiée de l'échelle ponctuelle à celle de la parcelle grâce à des modèles satellitaires étalonnés localement (R.67.1.55).

L'évaluation est également institutionnelle, et une étude menée sur le terrain permet de faire valoir ce point mieux que n'importe quel débat. Dans la vallée du Jourdain, l'analyse de l'uniformité mesurée des émissions sur 100 exploitations agricoles gérées par des agriculteurs, montre la coexistence de systèmes hydrauliquement adéquats avec une irrigation systématique de sur-irrigation et de sous-irrigation, la programmation des apports reposant davantage sur l'expérience que sur les besoins calculés (R.67.1.57). Une méta-analyse parvient à une conclusion compatible de la littérature, en demandant franchement si les systèmes d'aide à la décision pour l'irrigation sont utiles et en constatant une amélioration de la productivité de l'eau dans 57% des cas documentés, ce qui constitue probablement une limite supérieure compte tenu du biais de publication (R.67.1.11). La mesure, en bref, est en avance sur la pratique, et c'est un écart auquel le reste de ce rapport revient à plusieurs reprises.

3.3 Vers l'amélioration : de la mesure à la décision

Les outils d'aide à la décision et de planification traduisent la base de mesure en pratique. Certains des plus mûris ont complètement dépassé les recommandations : ils exécutent l'irrigation, enregistrent les résultats et ajustent l'intervention suivante (R.67.1.22, .56). Les plateformes opérationnelles sont documentées à l'échelle commerciale : HIDRIX, un système de gestion de l'irrigation et de la fertirrigation à la demande, associe la prévision à court terme des besoins en eau des cultures à une exécution autonome de la fertirrigation et à une traçabilité complète, affichant une réduction moyenne de l'irrigation de 15,8% et un gain de productivité de l'eau de 21,2% dans les exploitations pilotes (R.67.1.22); iFarm, une plateforme intelligente de gestion de l'irrigation conçue pour améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau, la performance économique et la résilience climatique au niveau de l'exploitation agricole en Thaïlande, combine le contrôle IoT, les prévisions et les données satellitaires sur 18 exploitations pilotes, avec période de retour estimée à 2,27 mois (R.67.1.56). Les architectures de type « jumeau numérique » intègrent la simulation hydraulique, les capteurs et la modélisation des cultures à l'échelle de la parcelle (R.67.1.43). Les prévisions saisonnières (ECMWF SEAS5) sont évaluées pour une estimation précoce des cycles culturaux et

des besoins en irrigation du maïs en zone méditerranéenne (R.67.1.48); les outils de programmation destinés aux producteurs des prairies sont comparés dans le cadre d'essais de rotation (R.67.1.46); les stratégies fondées sur le modèle AquaCrop pour représenter les techniques de collecte des eaux sont systématisées (R.67.1.62); enfin, le modèle Optirrig est calibré et validé pour la culture de la pomme de terre en Tunisie semi-aride, quantifiant les compromis entre rendement et quotas en cas de ressources limitées (R.67.1.67). Un plan pour une application hydrospatiale multi-échelles, IrrigAble, aborde l'écart persistant entre les flux de données disparates et les tableaux de bord utilisables (R.67.1.15), tandis que la modélisation de substitution utilisant des réseaux de neurones informés par la physique s'avère être la seule classe d'architecture qui reste fiable en dehors de la distribution de formation pour le contrôle du traitement des eaux réutilisées (R.67.1.13).

3.4 Amélioration : pratiques et équipements

Un nombre important d'articles porte sur l'amélioration des pratiques elles-mêmes. Des stratégies de déficit hydrique (total ou régulé) sont traduites en modalités opérationnelles : seuils d'humidité du sol spécifiques aux stades phénologiques des agrumes, mesurables directement par des capteurs de terrain (R.67.1.19); régimes d'irrigation contrastés pour le sorgho grain sous abris contre la pluie (R.67.1.39); irrigation goutte-à-goutte pour le maïs sur faible perméabilité des sols argileux, où des seuils de potentiel capillaire sont établis mais où la sécheresse atmosphérique limite les rendements potentiels (R.67.1.25). Au Zimbabwe, l'irrigation goutte-à-goutte souterraine de la canne à sucre permet d'économiser 30% d'eau tout en augmentant le rendement de 150 à 188 t/ha (R.67.1.17). La technique d'humidification et de séchage alternés (AWD) et la culture du riz par semis direct sont examinées tant comme des propositions de mise à l'échelle pour l'Asie du Sud (R.67.1.65) que de manière critique, à travers les obstacles structurels qui entravent l'adoption de l'AWD dans les systèmes gravitaires, où l'autorité de décision collective est mal adaptée aux incitations individuelles (R.67.1.58). L'application de épandage de précision d'effluents d'élevage via des systèmes d'irrigation à rampe frontale (R.67.1.21), le polymère superabsorbant à base de biodéchets fruitiers testé sur le blé, la tomate et le gombo (R.67.1.40), ainsi que la comptabilisation des gaz à effet de serre du système de culture riz-blé au Pendjab (R.67.1.28) complètent le tableau agronomique. À l'interface entre l'agronomie et la conception de systèmes, un modèle couplé hydraulique-sol-culture quantifie l'interaction entre l'uniformité hydraulique goutte-à-goutte et la variabilité initiale de la salinité du sol à l'échelle de la sous-unité, recommandant une uniformité de conception de 83% en conditions de forte salinité (R.67.1.52).

L'ingénierie des équipements et du transport de l'eau reste un domaine dynamique couvrant l'ensemble de la chaîne de distribution : goutteurs anti-colmatage à auto-rinçage des eaux chargées en sédiments (R.67.1.45); vanne intégrée de mesure et de contrôle de haute précision, dotée d'un système de vélocimétrie ultrasonique par couches affichant une erreur de débit de ±2 % (R.67.1.49); évaluation par vision par ordinateur de l'obstruction des canaux par la végétation (R.67.1.50); utilisation de l'ortho-imagerie acquise par UAV pour la mise à jour des inventaires géospatiaux de canaux (R.67.1.29); optimisation de l'irrigation par rotation dans le réseau de canaux de Houli à Taïwan (R.67.1.12) et de la régulation de pression dans les réseaux sous pression (R.67.1.34); programmation couplée macroscopique-hydrodynamique résolvant le problème de «volume satisfait mais niveau insuffisant» (R.67.1.23); fonctionnement multi-objectif des vannes basé sur la simulation dans un périmètre coréen (R.67.1.64); refonte soutenue par IoT, de l'irrigation gravitaire de surface dans la région de la Crau (R.67.1.64); conduites souterraines pour la distribution locale au Pendjab et au Gujarat (R.67.1.63); programmes de revêtement de cours d'eau, de nivellement par laser et d'irrigation goutte-à-goutte solaire à grande échelle au Pendjab pakistanais, portant l'efficacité du transport de 49% à 68% (R.67.1.05); automatisation des canaux dans

le cadre de la modernisation du réseau NLBC en Inde (R.67.1.41); et système de gestion de l'irrigation «prêt à l'emploi» basé sur des jumeaux numériques hydrauliques, permettant une économie d'eau de 10 à 25% (R.67.1.27) ; et canalisations du Pendjab et du Gujarat, dont les fortunes contrastées doivent plus aux institutions qu'à l'ingénierie (R.67.1.63), plutôt qu'au seul matériel.

3.5 Conditions d'adoption

Le thème définitif porte sur les personnes et les institutions qui prennent les décisions. La tarification volumétrique de l'eau, appliquée dans deux périmètres irrigués spécifiques japonais, réduit la consommation annuelle d'eau d'environ 20 à 40%, les effets les plus marqués étant observés lors des demandes de pointe et au sein des grandes exploitations (R.67.1.35). Les analyses nationales et multi-échelles font le point sur l'état d'adoption, les obstacles et les feuilles de route en Malaisie (R.67.1.42) et au Népal, où «écart entre les données et la prise de décision » est identifié comme la contrainte majeure (R.67.1.44); les périmètres irrigués dotés de « jumeaux numériques » sont étudiés en tant que paradigme de gestion émergeant en Chine (R.67.1.47); enfin, les systèmes d'information sur la gestion des eaux souterraines au Pendjab pakistanais sont présentés comme des outils de gouvernance pour la mise en œuvre de la loi sur l'eau du Pendjab (R.67.1.59). Des structures participatives sont documentées dans le bassin de Marun-Jarahi en Iran, où la codécision à l'échelle du comté concernant les plans de culture et les lâchers d'eau a amélioré l'efficacité et la confiance après la sécheresse de 2021 (R.67.1.54), ainsi que dans des zones irriguées de Taïwan (R.67.1.24) et dans un système d'irrigation fluvial aux Philippines où un diagnostic basé sur la méthode MASSCOTE, mené avec les agriculteurs, a révélé à la fois une ouverture à la technique d'irrigation d'humidification et de séchage alternés (AWD) et une tolérance sociale à l'égard des prélèvements non autorisés (R.67.1.61). Il apparaît que les conditions de réussite des technologies connectées au sein des réseaux collectifs dépendent moins de la technologie elle-même que de son intégration dans des stratégies sociotechniques cohérentes (R.67.1.14). Les portefeuilles de technologies «climato-intelligentes» sont examinés sous l'angle d'une agriculture résiliente (R.67.1.04); le cas de la Turquie permet de vérifier si la modernisation peut compenser la hausse de la demande induite par le climat, tout en soulignant que les économies réalisées à l'échelle de la parcelle ne se traduisent pas nécessairement par des économies à l'échelle du bassin sans une gestion appropriée de l'allocation des ressources (R.67.1.16); enfin, la prévision des pertes de cultures multiples dues aux typhons (R.67.1.20); l'analyse du retard des indices de sécheresse (R.67.1.18); l'exploitation des réservoirs combinant l'apprentissage automatique et la dynamique des systèmes (R.67.1.53) ainsi que le bilan hydrique des rizières à l'échelle du bassin versant (R.67.1.51) étendent la prise de décision au niveau de l'exploitation agricole vers une gestion des risques et de la sécheresse.

3.6 Réponse à la sous-question 67.1

Comment évaluer et améliorer les pratiques et technologies à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation ? Au vu de ces contributions, l'évaluation ne constitue plus un obstacle : l'état des sols, des cultures et de la salinité peut être mesuré sur le terrain à un coût décroissant (R.67.1.02, .30, .33, .60), l'évapotranspiration et la productivité de l'eau peuvent être quantifiées depuis l'espace à l'échelle de la parcelle individuelle (R.67.1.01, .03, .06), et la performance tant des pratiques que des outils d'aide à la décision peut elle-même être vérifiée (R.67.1.11, .57). L'amélioration suit deux voies documentées : les interventions quantifiées, à savoir les seuils de déficit, le goutte-à-goutte souterrain, la modernisation des systèmes de transport, les équipements de précision dont les effets sur l'eau et le rendement sont quantifiés dans de nombreux articles; et, de manière décisive, les interventions sur l'environnement décisionnel lui-même, puisque les articles convergent sur la constatation que les compétences et objectifs

individuels évoqués par la sous-question répondent aux prix (R.67.1.35), aux dispositions collectives (R.67.1.54, .58, .61) et à l'adéquation entre les outils et les systèmes agricoles réels (R.67.1.14, .44) au moins autant que les technologies mises à disposition.

4. SUB-QUESTION 67.2 —À L'ÉCHELLE TERRITORIALE, COMMENT EST-CE QUE LE PROCESSUS DE PRISE DE DÉCISION PEUT EXPLIQUER ET AMÉLIORER?

Les décisions territoriales s'expliquent par l'interaction des facteurs agricoles, économiques, environnementaux et réglementaires, et sont améliorées lorsque les infrastructures de données partagées, les mécanismes d'allocation et les dispositions participatives progressent ensemble.

4.1 Vue d'ensemble

Cinquante-trois documents ont été reçus dans le cadre de la sous-question 67.2. Les contributions répondent aux deux dimensions du mandat (c'est-à-dire l'explication et l'amélioration) et se répartissent naturellement en fonction de celles-ci. Un premier groupe de contributions explique le contexte de décision territoriale : les trajectoires de la ressource sous l'effet du changement climatique, les modèles réels de demande et d'utilisation, ainsi que les acteurs et institutions dont l'interaction aboutit aux décisions. Un deuxième groupe vise à améliorer le processus de décision lui-même, notamment grâce à des plateformes d'aide à la décision et des infrastructures numériques, à des mécanismes d'allocation et des instruments économiques, ainsi qu'à des infrastructures d'habilitation.

4.2.1 La ressource et ses trajectoires

Les décisions territoriales s'appuient sur des projections concernant la ressource. La modélisation hydrologique basée sur le projet CMIP6 (Projet d'intercomparaison des modèles couplés Phase 6) prévoit des modifications du ruissellement dans le bassin versant de Mae Klong (Thaïlande), avec des saisons pluvieuses tardives plus humides et des saisons sèches plus sèches (R.67.2.03); elle met également en évidence, en Algérie, une baisse statistiquement significative à long terme des précipitations et de la disponibilité par habitant, passant d'environ 1 500 m³ en 1962 à moins de 450 m³ (R.67.2.10). La segmentation des phases de sécheresse couplée à des prédictions par l'algorithme XGBoost (Extreme Gradient Boosting) soutient une réponse par étapes des réservoirs en Corée, pays soumis à la mousson (R.67.2.05); une analyse de fréquence régionale bivariée fournit des données sur les précipitations de référence pour le drainage agricole en Corée (R.67.2.41); la correction des biais des précipitations satellitaires améliore la représentation de la mousson dans le bassin de la Phetchaburi (R.67.2.35); enfin, l'analyse des tendances à long terme par télédétection permet de suivre les évolutions hydroclimatiques et les changements des usages des sols dans le bassin transfrontalier de la Kok, y compris la contamination par les métaux lourds (R.67.2.29). Le risque revêt également une dimension structurelle : la modélisation des inondations côtières associée à des données sur la qualité de l'eau permet de quantifier le risque de salinisation lié aux crues en ce qui concerne l'irrigation côtière en Indonésie (R.67.2.12); le modèle couplé de simulation du drainage et la programmation des vannes et des pompes réduit les dépassements de seuils d'engorgement dans le réseau fluvial plat en Chine (R.67.2.14); et la réutilisation des infrastructures de drainage en milieu boréal pour inclure des réservoirs de collecte d'eau est optimisée pour répondre aux sécheresses émergentes dans les régions nordiques (R.67.2.44).

Tableau 2. *Regroupements thématiques des contributions à la sous-question 67.2, avec leur fonction principale et les articles y associés.*

Regroupement thématique	Fonction principale	Articles (Numéro R)	Compte
Compréhension de la ressource et ses trajectoires	Disponibilité des projets, risques de sécheresse et d'inondation dans le cadre du changement climatique	R.67.2.03, .05, .10, .12, .14, .29, .35, .41, .44	9
Observation de la demande et de l'utilisation (observation de la Terre, comptabilité de l'eau)	Rend visibles la demande et la consommation d'eau à l'échelle du territoire	R.67.2.19, .31, .33, .36, .42, .45, .50, .51	8
Compréhension des acteurs et des institutions	Explique le bien-fondé des décisions prises à l'échelle du territoire	R.67.2.06, .08, .13, .20, .21, .27, .28, .37, .40	9
Plateformes d'aide à la décision et infrastructures numériques	Offre à tous les acteurs une vision partagée et opérationnelle de la ressourc	R.67.2.01, .02, .09, .11, .17, .18, .22, .23, .25, .32, .39, .53	12
Mécanismes d'allocation et instruments économiques	Transmet la rareté aux décisions par le biais des règles, des prix et des frais	R.67.2.04, .07, .16, .26, .30, .34, .43, .47, .48, .52	10
Infrastructure comme facilitateur	Expansion de ce que les décisions territoriales peuvent matériellement accomplir	R.67.2.15, .24, .38, .46, .49	5

4.2 Explication du contexte décisionnel

4.2.2 Observer la demande et l'utilisation

Une deuxième condition préalable à la prise de décisions territoriales est de savoir ce qui est réellement irrigué et consommé. À Taïwan, la présentation des rizières par intelligence artificielle à partir d'ortho-imagerie à haute résolution alimente l'estimation de la demande en eau (R.67.2.19); l'approche fondée sur les données ouvertes (CAWET) permet d'estimer la demande territoriale en eau pour la culture de la lavande au sud de la France (R.67.2.42); la cartographie multisource établit un lien entre l'eau du sol et le carbone, de la parcelle au bassin versant, pour les cultures pérennes méditerranéennes (R.67.2.31); la télédétection permet de surveiller l'état technique des terres drainées (R.67.2.33); l'estimation de l'évapotranspiration par le capteur MODIS fournit des coefficients d'efficacité de l'utilisation de l'eau compris entre 0,35 et 0,72 pour le cours inférieur de la Volga (R.67.2.45); la prévision de l'évapotranspiration (ET) par Réseau de neurones à convolution (CNN) atteint un coefficient de détermination (R^2) de 0,90 dans une ferme de recherche au Pakistan (R.67.2.36); l'évolution de deux décennies de la télédétection en Thaïlande donne lieu à la comptabilité de l'eau plus à l'échelle nationale

dans 25 bassins (R.67.2.50); enfin, la productivité économique de l'eau est évaluée pour les 22 bassins thaïlandais, révélant qu'une augmentation des allocations d'eau en saison sèche ne se traduit pas automatiquement par une hausse de la productivité économique (R.67.2.51).

4.2.3 Acteurs, institutions et anatomie des décisions

Les articles regroupés dans cette section apportent des éclairssements approfondis sur les raisons qui déterminent la nature des décisions territoriales. L'étude de cas de la Crau analyse les échelles imbriquées et la fragmentation institutionnelle au sein d'un hydrosystème où l'irrigation gravitaire assure 70% de la réalimentation de la nappe phréatique; ainsi, une irrigation jugée «inefficace» permet en réalité d'approvisionner en eau potable pour 300 000 personnes (R.67.2.08). Une analyse fondée sur des entretiens menés en Californie montre que les technologies de détection disponibles sont structurellement inadaptées aux systèmes des petites exploitations agricoles (R.67.2.20). Il est démontré que les districts d'amélioration des terres japonais supporte des charges méconnues de régulation des inondations, les canaux d'irrigation fournissant des services écosystémiques dans un contexte d'urbanisation (R.67.2.21). Des analyses multi-échelles de la gouvernance de l'irrigation en Malaisie identifient la fragmentation institutionnelle et la faible interopérabilité des données comme des contraintes majeures (R.67.2.27). Des contributions conceptuelles réorientent les modèles de transfert de la gestion de l'irrigation (IMT) et de la gestion participative de l'irrigation (PIM) vers une gouvernance polycentrique à l'échelle du bassin; elles mettent en garde contre l'effet de rebond lié aux gains d'efficacité (R.67.2.37) et proposent des architectures d'IA explicable pour surmonter la «crise de prise de décision» entre analyse et action (R.67.2.28). L'analyse économique axée sur les parties prenantes est présentée comme un outil de conception pour les projets de transition agroécologique et d'irrigation (R.67.2.06); les outils cluster-matrice encadrent la planification stratégique des zones interfluves irriguées (R.67.2.13); et l'irrigation pratiquée par les petits exploitants est documentée comme une forme de protection sociale de fait dans le périmètre de Chivi, au Zimbabwe (R.67.2.40).

4.3 Amélioration du processus de décision

4.3.1 Plates-formes et infrastructure de décision numérique

Le plus grand groupe de contributions construit des systèmes territoriaux d'aide à la décision. Les simulateurs hydrologiques à l'échelle du bassin prennent en charge la gouvernance de la sécheresse anticipée avec des horizons de six mois (WatSim, R.67.2.01). L'outil co-créé IPON (Irrigation Performante de l'Office du Niger) calcule onze indicateurs de performance d'irrigation pour les 142 000 ha de l'Office du Niger à partir des données WaPOR et de données de distribution, avec une propriété institutionnelle documentée, privilégiant «l'instauration d'un climat de confiance avant la mise au point de l'outil» (R.67.2.02). En Inde, les plateformes nationales intègrent l'IA, l'IoT et des jumeaux numériques à très grande échelle (R.67.2.09); l'apprentissage automatique permet d'estimer l'humidité des sols à l'échelle de la parcelle à travers l'Europe sans exiger des capteurs in situ sur chaque champ (Soil Vision, R.67.2.11); l'application géospatiale soutient la planification nationale de l'irrigation au Rwanda malgré des contraintes liées aux données (R.67.2.17); au Maroc, la plateforme web relie la comptabilité de l'eau et le lien entre Eau-Énergie-Alimentation-Écosystèmes (WEFE) grâce à la simulation participative de scénarios (R.67.2.18); en Provence, les réseaux d'eau intelligents comptant 68 000 points de distribution déploient les compteurs d'eau intelligents, les jumeaux numériques et l'IA (REImu, R.67.2.22); l'apprentissage automatique intégrant des lois physiques résout des conflits morphodynamiques dans un bassin indonésien via un jumeau numérique partagé (R.67.2.32); l'IA et la gouvernance des données sont combinées au sein de la base de données nationale d'irrigation et de l'outil de calcul d'irrigation de l'Arabie saoudite, couvrant 29 villes (R.67.2.39); en Italie, les portefeuilles de produits issus de

l'observation de la Terre soutiennent la prise de décision à plusieurs échelles, de la parcelle au bassin versant (R.67.2.53); les cadres adaptatifs pilotés par l'IA sont conçus pour les systèmes combinant les zones humides–agricoles (R.67.2.25); enfin, l'étude de synthèse sur la télédétection appliquée à la gestion de l'irrigation identifie le manque de co-création comme le principal obstacle à l'adoption de ces technologies (R.67.2.23).

4.3.2 Mécanismes d'allocation et instruments économiques

Le deuxième levier concerne l'allocation. La modélisation des institutions de comptage en Afrique du Sud montre que seul le comptage volumétrique direct rend explicite la valeur d'ombre de l'eau («shadow value») de l'eau et incite les arroseurs à passer d'une réduction des surfaces irriguées à une irrigation déficitaire (R.67.2.43). Quatre modes de participation fondés sur le capital social (gestion par concession, modèle «irrigation agricole +», échanges de droits d'eau et finance verte) sont analysés dans des périmètres irrigués modernes de la Chine (R.67.2.07). L'optimisation multi-objectifs permet de coordonner la structure de l'eau et des cultures dans un périmètre du Sichuan (R.67.2.30) et les stratégies de régulation eau-sol sont dérivées pour le bassin versant de Jaune à partir d'une analyse de dynamique des systèmes WEEF (eau-écologie-énergie-alimentation) et d'un diagnostic de résistance climatique (R.67.2.34). La tarification de l'eau gérée par satellite améliore l'identification des usagers et le recouvrement des frais dans la vallée du Sénégal (projet MOSIS, R.67.2.48); une politique proactive de sobriété d'eau sur le canal de Carpentras est examinée comme levier de réallocation territoriale, tout en soulignant ses limites face au changement climatique (R.67.2.52); une l'évaluation territoriale du cycle de vie compare les scénarios d'infrastructure et de diversification en Provence sous l'angle de l'éco-efficacité (R.67.2.04); une modernisation du périmètre irrigué de Hetao (bassin versant de Jaune) est interprétée comme une transition impliquant des compromis explicites entre l'économie d'eau, l'expansion des cultures de rente et le risque de salinisation (R.67.2.16); enfin, un diagnostic intégré de la réforme de l'irrigation d'un grenier à riz malais affichant une efficacité de 17% aboutit à la définition de règles d'allocation déclenchées par des paramètres hydrologiques (R.67.2.47).

4.3.3 infrastructure en tant que facilitateur

Les décisions territoriales sont en fin de compte contraintes par des systèmes physiques. Les tapis composites cimentaires géosynthétiques permettent de réhabiliter les canaux en quelques jours, avec une réduction de l'infiltration documentée à 96% en Californie et une installation hivernale en Hongrie (R.67.2.15); des stratégies de riziculture économes en eau sont simulées à l'aide de QGIS-SWAP-Paddy (une version spatialisée du modèle SWAP, intégrant un module simulant la percolation du réseau de canaux) et couplées à MODFLOW-6 à Lomellina (Italie), où l'humidification et le séchage alternés favorise une réalimentation précoce des nappes tout en atténuant la demande de pointe (R.67.2.24); en Iran, des couvertures photovoltaïques installées sur des canaux réduisent considérablement l'évaporation tout en produisant de l'électricité, avec une période de retour de 10,7 ans (R.67.2.38); en Californie,un aménagement du bassin de réalimentation transforme des terres agricoles acquises en zones de stockage des eaux souterraines, conformément au SGMA (la loi sur la Gestion durable des eaux souterraines de 2014) (R.67.2.46); enfin, des enquêtes aériennes menées par véhicule aérien sans pilote (UAV) couplées à une modélisation hydraulique HEC-RAS permettent une évaluation hydraulique rapide d'un canal indien de 26 km, en identifiant les zones de fort exhaussement et les risques de débordement (R.67.2.49).

4.4 Réponse à la sous-question 67.2

Comment expliquer et améliorer le processus de prise de décision à l'échelle territoriale? À cet égard, il apparaît que ce processus est façonné par quatre types de facteurs : facteurs

agricoles (structures des cultures et besoins en eau associés, R.67.2.19, .30, .42), facteurs économiques (tarification de l'eau, recouvrement des frais, écarts de productivité, R.67.2.43, .48, .51), facteurs environnementaux (trajectoires climatiques, salinité, réalimentation et fonctions écosystémiques, R.67.2.03, .08, .10, .12, .21) et facteurs réglementaires (règles d'allocation, mandats institutionnels et leur fragmentation, R.67.2.27, .37, .46, .47). Il améliore le processus selon trois leviers complémentaires que les articles documentent avec des preuves opérationnelles : des infrastructures d'information partagées et fiables, offrant à tous les acteurs une vision commune de la ressource (R.67.2.01, .02, .18, .22, .50, .53); les mécanismes d'allocation et économiques qui transmettent la rareté aux décisions (R.67.2.07, .43, .48, .52); et les dispositions participatives permettant de transformer l'information en décisions acceptées (R.67.2.02, .18, .23). Les contributions combinant ces trois leviers sont précisément celles qui font état d'une adoption institutionnelle soutenue.

5. CONVERGENCES ET COMPROMIS

5.1 Convergences

Trois convergences transversales aux deux sous-questions peuvent être dégagées.

- Tout d'abord, l'Observation de la Terre a achevé sa transition de la recherche à l'exploitation : les mêmes familles de produits WaPOR, Sentinel, Landsat et OpenET apparaissent dans la programmation des irrigations à l'échelle de l'exploitation ainsi que dans la comptabilité nationale de l'eau.

- Deuxièmement, la co-création — définie comme la conception conjointe d'outils et de règles avec les utilisateurs finaux dès le départ, plutôt que leur transfert après développement — est systématiquement identifiée, indépendamment sur quatre continents, comme le facteur déterminant de l'adoption (R.67.1.22, R.67.1.54, R.67.1.61 ; R.67.2.02, R.67.2.17, R.67.2.18, R.67.2.23).

- Troisièmement, l'anticipation remplace la réaction comme principe organisateur de la gestion de l'eau, allant des prévisions hebdomadaires d'évapotranspiration (ET) aux perspectives de sécheresse à six mois.

Cette convergence est aussi bien structurelle que thématique : les deux sous-questions décrivent la chaîne de décision illustrée par la figure 2, lue à deux échelles différentes. Ce que l'exploitation observe au niveau des sols et des cultures, le territoire l'observe à l'échelle des périmètres irrigués et des aquifères; la programmation à l'échelle de l'exploitation trouve son équivalent dans l'allocation et la planification, le contrôle automatisé des parcelles dans la gestion des réservoirs et des réseaux, et les rapports traçables de l'arroseur en matière de comptabilité des eaux territoriales, le recouvrement des frais et les vérifications. La gouvernance conditionne chaque étape aux deux échelles, des règles collectives de distribution jusqu'aux politiques d'allocation et de données.*

5.2 Compromis

Les articles des deux sous-questions démontrent, avec des données, que les gains d'efficacité réalisés à une échelle ne se traduisent pas automatiquement à l'autre : les économies réalisées au niveau de la parcelle diminuent à l'échelle du bassin sans gestion de l'allocation (R.67.1.16); la micro-irrigation techniquement adéquate peut coexister avec la programmation inadaptée (R.67.1.57); les gains d'efficacité peuvent entraîner une augmentation de la demande (R.67.2.37, R.67.2.16); enfin, ce sont les modalités de comptage (et non les goutteurs) qui déterminent si la pénurie affecte la fonction objectif de l'arroseur (R.67.2.43, R.67.1.35). **

Une deuxième question concerne les personnes desservies : l'offre technologique est calibrée sur des exploitations disposant de ressources suffisantes, tandis que les petites exploitations et celles situées en marge du système restent en dehors des hypothèses de conception (R.67.2.20, R.67.1.33, R.67.1.63).

5.3 De l'innovation d'habilitation à l'innovation transformatrice

Les contributions peuvent être placées sur une échelle à quatre niveaux distinguant la nouveauté de la transformation. La classification proposée ci-dessous est un «appareil de lecture» et non un jugement porté sur les articles individuels.

Tableau 3. Échelle à quatre niveaux des innovations présentées, allant de l'innovation d'habilitation à l'innovation transformatrice. Cette classification est proposée comme un appareil de lecture et non comme un jugement sur les articles individuels.

Niveau	Caractéristiques	Exemples tirés des documents
1. Facilitateur	Améliore la mesure ou un composant technique spécifique	R.67.1.33, .45, .49, .60; R.67.2.36, .41
2. Intégré	Combine plusieurs flux d'informations en aide à la décision	R.67.1.15, .43, .48; R.67.2.11, .18
3. Opérationnel	Modifie la gestion en temps réel ou met en œuvre des décisions	R.67.1.22, .27, .56; R.67.2.01, .22
4. Transformateur (institutionnel)	Modifie les acteurs de la décision, les modalités d'allocation de l'eau ou les méthodes de vérification de la performance	R.67.1.35, .54; R.67.2.02, .07, .43, .48

L'échelle n'est pas un classement de la sophistication technique. Un outil sophistiqué reste une innovation d'habilitation s'il ne parvient jamais à prendre une décision réelle, tandis qu'un changement institutionnel relativement simple, tel qu'une tarification volumétrique ou un plan d'assolement défini conjointement, peut être transformateur s'il modifie durablement le comportement d'utilisation de l'eau.

6. CONCLUSIONS

Où en sommes-nous ? Sur la base de ces contributions : l'observation et la prévision sont devenues une infrastructure opérationnelle; la couche d'aide à la décision est en cours de construction à toutes les échelles, de la parcelle au niveau national; et la contrainte majeure pesant sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau est passée de la mesure à la gouvernance — c'est-à-dire vers les institutions, les incitations et les relations qui déterminent si les données mesurées influencent réellement les décisions prises.

La sous-question 67.1 montre que les pratiques au niveau de la parcelle peuvent désormais être évaluées avec une précision sans précédent et améliorées par des interventions documentées et quantifiées. La sous-question 67.2 démontre que la prise de décision à l'échelle territoriale peut être expliquée — et donc améliorée — lorsque les infrastructures de données, les mécanismes d'allocation et les dispositions participatives progressent de concert. Les travaux convergent vers une même orientation : une conception conjointe de la technologie et des institutions, des outils élaborés avec leurs utilisateurs et une gestion qui anticipe plutôt qu'elle ne réagit.

Quatre questions traversent ces travaux sans jamais trouver de réponse : qui paie, à qui appartiennent les données, que se passe-t-il en cas de défaillance technologique et qui bénéficie du système ? En tenant compte des compromis évoqués dans la section 5, les orientations suivantes se dégagent :

1. Présenter les résultats en matière d'efficacité à plusieurs échelles : plusieurs contributions montrent que les économies réalisées à l'échelle de la parcelle ne correspondent pas nécessairement à celles observées à l'échelle du bassin; les études revendiquant des économies d'eau devraient préciser l'échelle concernée et, dans la mesure du possible, la destination finale de l'eau ainsi « économisée » (R.67.1.16 ; R.67.2.16, .37, .43).

2. Concevoir les outils en vue de leur adoption dès le départ : trop souvent, les outils sont d'abord développés selon des critères techniques avant d'être diffusés aux agriculteurs et aux gestionnaires de l'eau via des formations et des démonstrations. Les travaux montrent que cette approche fonctionne rarement : une adoption durable est observée lorsque les utilisateurs finaux participent à la conception de l'outil dès le début — en définissant ses fonctionnalités et son intégration dans leurs processus de décision réels — alors que l'adoption échoue lorsqu'ils sont simplement formés à un produit fini (R.67.1.22, .54, .61 ; R.67.2.02, .17, .18, .23).

3. Associer chaque plateforme numérique à un plan de durabilité institutionnelle et financière : le fonctionnement à long terme des nombreuses plateformes présentées (continuité des données, maintenance, ressources humaines au-delà de la phase de projet) est l'aspect le moins documenté de ces travaux. Les contributions intégrant une analyse économique, telles que la R.67.1.56 qui présente des chiffres explicites concernant la période de retour et le taux d'adoption, démontrent qu'il est possible de le faire.

4. Définir rapidement la propriété des données et l'interopérabilité : l'irrigation devenant une activité gourmande en données, la propriété de ces dernières, le maintien de l'accès et la capacité des systèmes à communiquer entre eux déterminent si les plateformes survivront au-delà de la durée des projets La faiblesse de l'interopérabilité est déjà identifiée comme une contrainte majeure en ce qui concerne la gouvernance (R.67.2.27), et les dispositions nationales de gouvernance des données commencent seulement à émerger (R.67.2.39).

5. Anticiper aussi bien les défaillances que les performances : l'irrigation automatisée et l'allocation assistée par l'IA nécessitent des procédures de secours, une définition claire des responsabilités en cas de reprise manuelle et une communication honnête sur les incertitudes. Ces questions sont à peine abordées dans les résumés.

6. Veiller à la qualité des mesures : la fiabilité des outils d'aide à la décision dépend de la qualité des données qui les alimentent; mais, la précision des mesures est rarement vérifiée ou communiquée, et les erreurs se propagent silencieusement dans toutes les décisions en aval. Les normes et le signalement systématique des erreurs méritent une attention particulière (R.67.1.33, .37, .57).

7. Concevoir des solutions pour les petits exploitants, et pas seulement pour les exploitations bien équipées : les technologies d'irrigation disponibles sont largement calibrées pour des systèmes agricoles disposant de ressources suffisantes; les petites exploitations et celles situées en marge du système doivent être prises en compte dès la phase de conception, plutôt que de devoir s'adapter à des outils conçus pour d'autres (R.67.1.63 ; R.67.2.20, .40).

8. Valoriser l'ensemble des services rendus par l'eau d'irrigation : les infrastructures d'irrigation fournissent souvent des services allant au-delà de la production agricole (réalimentation des aquifères, régulation des crues, soutien aux écosystèmes). Les débats sur l'allocation territoriale de l'eau devraient évaluer « l'efficacité » au regard de cet ensemble de fonctions, et non pas uniquement par rapport à l'utilisation/la productivité de l'eau des cultures (R.67.2.08, .21, .24, .46).

Si toutes ces contributions convergent vers un objectif unique, c'est bien celui de la responsabilité : un secteur de l'irrigation capable d'indiquer quelle quantité d'eau était disponible, comment elle a été utilisée, pourquoi certaines décisions ont été prises et ce qui devrait changer à l'avenir.

REMERCIEMENTS

Le Rapporteur général tient à remercier les auteurs des 117 contributions analysées dans le cadre de la Question 67, dont les travaux constituent la substance de ce rapport; les membres du groupe d'experts, pour leur soutien lors de l'examen des soumissions et l'élaboration de l'analyse ; ainsi que le Bureau central de la CIID, pour son aide en matière de communication et pour la transmission en temps opportun de tous les documents.