

QUESTION 66:

**IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE, HOW CAN IRRIGATION
AND DRAINAGE CONTRIBUTE TO THE AGRO-ECOLOGICAL
TRANSITION?**

**FACE AU DÉFI CLIMATIQUE, COMMENT L'IRRIGATION ET LE
DRAINAGE PEUVENT CONTRIBUER À LA TRANSITION
AGROÉCOLOGIQUE?**

GENERAL REPORTER / RAPPORTEUR GÉNÉRAL

Dr. Vinay Nangia (ICARDA)

PANEL OF EXPERTS / GROUPE D'EXPERTS

Delphine Leenhardt (France)

Suat Irmak (USA)

Tian Fuqiang (China)

Giulio Castelli (Italy)

Istvan Szamosvari (Hungary)

Vasudha Sharma (USA)

Vaishali Sharda (USA)

Keigo Noda (Japan)

Meetpal Kukal (USA)

Rafat Nael (Iraq)

QUESTION 66:**IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE, HOW CAN IRRIGATION AND DRAINAGE CONTRIBUTE TO AGRO-ECOLOGICAL TRANSITION?****GENERAL REPORT**

Dr. Vinay Nangia (ICARDA)*

*General Reporter***ABSTRACT**

Agroecology is widely recognized as a framework for designing sustainable food systems based on ecological principles, yet irrigation and drainage—the water management infrastructures upon which 40% of global food production depends on—remain largely absent from the agroecological discourse. A systematic review of scientific literature identified only 38 articles explicitly linking irrigation and agroecology as of April 2023, with most treating irrigation superficially rather than as a transformative component of agroecological systems (Leauthaud et al., 2025). This position paper synthesizes the current state of knowledge on the intersection of irrigation, drainage, and agroecology, argues that the disciplinary divide between these fields is no longer tenable under climate change, and proposes that irrigation and drainage be evaluated as multiservice interventions within coupled human–water systems, distinguishing conventional infrastructure from hybrid grey–green and ecosystem-based measures. We draw on emerging evidence from precision and variable-rate irrigation, deficit irrigation, conservation agriculture–irrigation interactions, controlled drainage, water harvesting, and diversified irrigated cropping systems across diverse geographic and institutional contexts—from the Indo-Gangetic Plains and the Tarim Basin to the Mediterranean, sub-Saharan Africa, and the American Midwest. Drawing on the collective expertise of the Question 66 co-lead team, we propose six research priorities that emerge from gaps identified in the literature and from practical challenges faced by irrigation and drainage professionals worldwide. We conclude that the 26th ICID Congress provides a critical platform to bridge this knowledge gap and to reposition irrigation and drainage as integral components of climate-resilient, ecologically grounded food systems.

Keywords: agroecology, irrigation, drainage, multiservice irrigation, nature-based solutions, climate change, ecological transition, water productivity, ecosystem services, precision irrigation, water harvesting

Introduction: A Knowledge Divide that Climate Change Can No Longer Tolerate

Agroecology has emerged as a scientifically grounded framework for redesigning food systems based on ecological principles, encompassing agronomic, ecological, socioeconomic, political, and cultural dimensions (Wezel et al., 2020; FAO, 2018; HLPE, 2019; Murgia et al., 2026). Its premise is to produce sustainable food while working in harmony with natural principles. It embraces a holistic, multi-scale, and multi-actor approach to reshaping food systems in response to environmental, economic, and social challenges in dryland and irrigated agricultural systems. Thus, agroecological as well as supporting functions such as agricultural production practices (soil and water conservation; irrigation management;

* Research Team Leader - Soils, Waters and Agronomy, International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), Rabat, Morocco. E-mail: v.nangia@cgiar.org

fertilizer, weed and pest management, crop management; and other agricultural management practices should work together in harmony to achieve greater positive impact on global food security while protecting and sustaining agroecological functions and environmental services. While irrigated agriculture accounts for approximately 20% of global cultivated land, it produces 40% of the world's food (FAO, 1996; Grafton et al., 2018). Globally, about 70% of freshwater withdrawals are for irrigated agriculture. Both agroecology and irrigation are promoted as climate change adaptation measures (IPCC, 2023; Pörtner et al., 2022), and both aim to enhance the sustainability of food systems to meet the rapidly growing world population's food and fiber demand. Thus, irrigated agriculture will continue to play a crucial role in meeting this demand, and its importance to societies and all humankind is only getting more critical over time, considering the negative implications of climate change on agricultural productivity (Irmak, 2023). Irmak et al. (2025) stated that with the projected need of 60% more food production to achieve food security by 2050, the challenge is how to achieve this goal with the same or even reduced water resources without sacrificing water's other ecological services and functions. They further suggested that the challenge is even greater when other stressors to this resource, such as climate change, pollution, poor management and policy, and landscape alterations, are taken into consideration.

Yet, in practice, these two spheres of knowledge and practice remain strikingly disconnected. Leauthaud et al. (2025), in the first systematic literature review at the interface of irrigation and agroecology, identified 38 scientific articles in the Clarivate Web of Science through April 2023. Of these, fewer than ten adopted an analytical and critical approach to the relationship, and irrigation was most often mentioned only superficially—as a farm feature rather than as a potential agroecological asset (Leauthaud et al., 2025) and a vital method for sustainable food production. The terms “irrigation” and “agroecology” were found to be statistically disconnected within the papers themselves, appearing in different sections and with weak interactions, suggesting that even when both concepts appear in the same study, they are rarely integrated (Leauthaud et al., 2025). This could potentially be due to the fact that the scientific community has not been explicitly making the case to collectively study these two spheres of practical concepts and evaluate their collective impact on natural resources, agricultural practices and agricultural productivity, which may be considered as a missed opportunity until now.

This disciplinary divide has deep structural roots. Irrigation and agroecology differ in their narratives (mainstream versus alternative agriculture), goals (efficiency and productivity versus health and livelihoods), approaches (technological versus holistic), scales of analysis and implementations (plot and irrigation system versus farm and local, regional or global food systems), and stakeholders (distinct associations, government ministries, and research laboratories) (Leauthaud et al., 2025; Fischer et al., 2025). These differences have led to missed opportunities to design irrigation systems that enhance ecosystem functions and services (Leauthaud & Leenhardt, 2025).

As climate change accelerates, this disconnect is no longer tenable. The IPCC (2023) has emphasized that climate change is already impacting water availability, agricultural productivity, and food security across regions, with the most severe effects concentrated in arid and semi-arid areas where irrigation is often the difference between crop failure and viable harvests. Zhao et al. (2026) demonstrated that climate change and irrigation expansion are already reshaping water pressure and upstream–downstream interactions in the Lancang–Mekong River Basin, with local water-saving gains increasingly offset by expanded irrigation at the basin scale—a finding with global implications for irrigated agroecosystems under climate stress. The question is no longer whether irrigation and drainage should be part of the agroecological transition, but how they can be redesigned and repositioned to contribute to it.

IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE, HOW CAN IRRIGATION AND DRAINAGE CONTRIBUTE TO AGRO-ECOLOGICAL TRANSITION?

Agroecology is recognized as the design and implementation of sustainable agriculture based on ecological principles and services. It embraces a holistic, multi-scale, and multi-actor approach to reshape food systems in response to environmental (including climate), economic, and social challenges.

Traditionally, irrigation and drainage—both surface and sub-surface—have been used to manage water availability, allocation and management by bringing water in the absence of rain and removing excess water when rainfall is too abundant to improve agricultural productivity. These tools are often associated with input-intensive and use of environmentally harmful agro-industrial systems, seemingly distant from agroecological principles.

However, in the face of climate change, both irrigation and drainage, together with water harvesting, should be reconsidered not merely as tools for intensification, but as key components of climate-resilient, ecologically sensitive and grounded systems. As such, they can be considered for their integration in nature-based solutions that stabilize or improve yields, improve soil health, reduce negative environmental impacts, and support diversified production.

Emerging research—although still limited—suggests that these water management practices can actively contribute to agroecological transitions, especially when combined with indigenous knowledge and traditional practices adapted to local contexts. Policy and economic instruments will also play a crucial role in encouraging this shift, by aligning incentives with long-term sustainability goals.

Despite their potential, the links between agroecology and irrigation and drainage remain underexplored: as of April 2023, only 38 scientific articles explicitly connect these management tools. Often, irrigation is mentioned superficially, without in-depth analysis of its transformative role and without connection to agroecological services considerations.

This congress seeks to address that gap. It invites researchers, practitioners, and policymakers to explore how irrigation, surface and sub-surface drainage, rainwater harvesting, and nature-based water solutions—when guided by agroecological principles—can help build sustainable, inclusive, and resilient food systems for the future.

The Current State of Knowledge: Irrigation as the “Invisible Sidekick” of Agroecology

A fragmented evidence base

The systematic review by Leauthaud et al. (2025) revealed that the scientific literature at the intersection of irrigation and agroecology is not only scarce but fragmented. Most of the 38 identified papers were confined to water budget analyses of cropping systems or to experimental manipulations testing individual agroecological practices under irrigated conditions on small (field) scales. Only a small number acknowledged the co-existence of irrigation and agroecology as compatible system components, and fewer still argued that irrigation offered an opportunity for agroecological systems (Mdee et al., 2019; Leauthaud et al., 2022a, 2022b; Romero et al., 2022; Altieri, 1992).

Several papers, conversely, explicitly opposed irrigation and agroecology, associating irrigation with intensive input use and agricultural industrialization (Perez Neira, 2016; Gross and Jaubert, 2019; Basche and Edelson, 2017). This opposition reflects a broader narrative in which irrigation is framed as a tool of the Green Revolution and agro-industrial systems, seemingly distant from agroecological principles (Leauthaud et al., 2025).

Emerging evidence at the field scale

Despite the overall scarcity, a number of recent studies have begun to demonstrate that irrigation and agroecological practices can be mutually reinforced when jointly designed:

Deficit irrigation and agroecological viticulture. Romero et al. (2022) provided the most comprehensive review to date of combining deficit irrigation strategies and agroecological practices in Mediterranean vineyards, arguing that irrigation and agroecology should be associated with jointly improving water use efficiency, productivity, and sustainability. Xue et al. (2025) demonstrated that delayed irrigation reduced total water consumption by 54.8% while improving economic benefits and reducing crop disease, suggesting that strategic water stress can serve both productivity and ecological functions.

Conservation agriculture under irrigated conditions. Kienzler et al. (2012) showed that conservation agriculture practices under irrigation altered water use patterns in Central Asia, while Mohammad et al. (2018) showed that direct-seeded rice under conservation agriculture in the Indo-Gangetic Plains reduced water consumption compared to transplanted puddled rice. Through well-planned, coordinated and executed research, demonstration, and education programs network (Agricultural Water Management Network, AWMN), Irmak (2023) showed a large-scale technology implementation in partnership with almost 1,000 growers (representing 1.20 million ha irrigated cropland), can result in water withdrawal reduction of 144 mm/ha per growing season due to the adoption of technologies and management strategies demonstrated and taught in the AWMN. Between 2005 and 2020, the AWMN is estimated to have reduced irrigation water withdrawal by over 5 billion m³ (5 km³; 4.1 million acre-ft), and this conserved water was made available for other agroecological uses. The AWMN has become the largest and most impactful research-based water management program in the United States, achieving substantial adoption of technology and information/knowledge transfer in agriculture through the strong, dedicated partnership of universities, private industry, state and federal agencies, producers, irrigation districts, and crop consultants. This indicates that, working in partnership with all professionals and practitioners involved in agriculture, water management, and agroecology settings, significant reductions can be achieved in irrigated agriculture that can be made available for protecting/sustaining the agroecological and environmental services. Kukal and Irmak (2021) reviewed conservation agriculture effects on soil water holding capacity and water-saving across diverse agroecological conditions, finding that CA effects on water-saving varied with management practices and agroecological context—a critical nuance for the irrigation–agroecology interface. Alletto et al (2022) showed that soil physical properties are strongly influenced by cropping systems, that the soil bulk density is generally higher under conservation agriculture, soil hydraulic conductivity is generally higher and more stable over time under conservation agriculture, and soil water retention is equivalent or slightly higher under conservation agriculture than in conventionally tilled soils. More recently, Devkota et al. (2025) showed that context-specific agronomic solutions integrating conservation agriculture with optimized irrigation achieved agronomic gains with reduced environmental footprints in irrigated drylands of Egypt.

Precision and variable-rate irrigation. Sharma and Irmak (2020) conducted economic comparisons of variable rate irrigation and fertigation with fixed (uniform) rate irrigation, demonstrating that site-specific water and nutrient management can improve both water productivity and economic returns while reducing input intensity—an outcome consistent with agroecological principles of input reduction and resource efficiency. Sharma and Irmak

(2021a) further demonstrated that the effectiveness of variable rate irrigation depends strongly on spatial variability of soil type, topography, and soil-water dynamics. Across three years and three soil types, they found that crop evapotranspiration and available soil water respond differently to irrigation and nitrogen management across landscape positions, demonstrating that uniform irrigation strategies may not adequately account for spatially heterogeneous crop water requirement. Sharda et al. (2022) advanced the spatial resolution of irrigation management by evaluating sub-field level crop water stress for variable rate irrigation, providing the technical foundation for irrigation scheduling that accounts for within-field heterogeneity—a prerequisite for managing diversified, agroecologically oriented cropping systems where water demand varies spatially and temporally. Irmak et al. (2025) and Irmak and Hinn (2025) showed how variable rate irrigation in different soil types can be effectively managed to enhance crop productivity and improve input use efficiency. Irmak et al. (2023) and Irmak and Mohammed (2023) investigated how different irrigation methods/systems (subsurface drip irrigation, center pivot irrigation and gravity (furrow) irrigation) can be most efficiently and effectively managed for irrigation and nitrogen management to improve economic of maize production, increasing nitrogen use efficiency and crop water productivity to conserve these critical resources and aid in protecting the agroecological services through reduction or minimizing the chemical contamination of ground and surface water resources and making more water available to agroecology platforms through advanced conservation and management practices.

Drip irrigation and organic fertigation. Several studies identified drip irrigation as a practice compatible with agroecological objectives, particularly when combined with organic fertigation strategies (Guzman and Alonso, 2008; Leauthaud et al., 2022b; Akakpo et al., 2021). Other research projects demonstrated effective irrigation and fertigation management strategies for subsurface drip irrigation under different soil, crop and irrigation methods and management practices (tillage, plant population density, etc.) in different climates to enhance crop water and nutrient use efficiency and improve yield under full, deficit and limited irrigation settings (Payero et al., 2008; Irmak et al., 2015; Irmak and Djaman, 2016; Yonts et al., 2018; Mohammed and Irmak, 2022; Irmak et al., 2022; Irmak et al., 2023; Irmak, 2024). Drip irrigation enables the use of concentrated organic fertilizers requiring less energy, and can be combined with cover crops and mulch to reduce evaporation (Wezel et al., 2014). However, the classification of drip irrigation as an agroecological practice has been questioned because of plastic consumption and rebound effects at larger spatial scales (Leauthaud et al., 2025; Grafton et al., 2018). Irmak et al. (2024) and Irmak et al. (2025) stated that in addition to traditional inputs (water, nutrients, chemicals) applied to soil and consumed by crops, the utilization/application of other inputs such as synthetic plastic in agriculture for a variety of applications has been increasing globally, causing environmental contamination and other challenges. Synthetic plastic mulching is particularly preferred for weed control in certain crops where few herbicides are available. Mulches made from synthetic polymers such as polyethylene are commonly used in agriculture. However, these petroleum-based polymers are stable/non-degradable, and their widespread use in agricultural fields can create serious environmental problems.

Cover crops and irrigation interactions. Rouge et al. (2022) demonstrated that irrigation can favor cover crop establishment and support their development to deliver desired ecosystem services, highlighting the interactive effects between water management and agroecological practices. Basche and Edelson (2017) described how practices promoting continuous living cover improve water management by changing the water balance and increasing soil hydrological functions. Irmak et al. (2018) stated that, in addition to supplying nitrogen and other beneficial nutrients and micronutrients to a subsequent cash crop, cover crops can also provide additional organic matter to the soil, which may improve soil organic matter, soil physical properties, and infiltration characteristics. Cover crops also have potential to improve the soil's capacity to carry machines and improve field accessibility (primarily in humid

areas with substantial precipitation) and remove excess water and maintain soil structural components.

Irrigation and crop diversification. Altieri (1992) saw irrigation as an opportunity for crop diversification and a way to improve system resilience, while Leauthaud et al. (2022a) described irrigation as an important factor in the development of agroforestry in olive groves in Tunisia. Mdee et al. (2019) showed in Tanzania that farms offered better livelihoods when agroecological production systems were implemented with joint access to irrigation.

Evidence at farm, territorial, and food system scales

Research at scales beyond the field plot remains particularly scarce. Moraine et al. (2016) showed that introducing lower-water-requirement cropping systems in water-stressed areas could affect water resources at the territorial scale, with less-irrigated crops such as alfalfa balancing irrigation water consumption at the watershed level while facilitating integrated crop-livestock systems. Galeana-Pizana et al. (2021) highlighted linkages between irrigation and food system characteristics, showing that small-scale irrigation could substantially increase smallholder crop yields in drier ecoregions where agroecological produce is sold in local markets.

Gross and Jaubert (2019), from a social science perspective, explored stories of failed implementation of both irrigation development projects and agroecological development projects in Burkina Faso, finding numerous similarities between the two and providing constructive critiques of how both are promoted without adequately accounting for smallholder farmers' diverse situations and strategies. The hydrological consequences of irrigation at the basin scale have been documented by Zhang et al. (2014), who showed that water-saving irrigation in the Tarim River basin oasis had complex implications for groundwater dynamics and sustainable water management, and by Zhao et al. (2026), who demonstrated that climate change and irrigation expansion are reshaping water pressure across the Lancang–Mekong basin—evidence that the agroecological transition of irrigated systems must be evaluated within its broader hydrological and sociohydrological context (Liu et al., 2014, 2015; Han et al., 2017)..

Climate Change as a Catalyst for Reconciliation

Climate change is intensifying the urgency of bridging the irrigation–agroecology divide. The IPCC Sixth Assessment Report (2023) documents increasing frequency and severity of droughts, altered precipitation patterns, and rising temperatures that disproportionately affect agricultural systems in water-scarce regions. Pörtner et al. (2022) emphasized that climate change impacts on food systems are mediated through water, making water management a central lever for climate adaptation.

In this context, irrigation and drainage should be reconsidered not merely as tools for intensification, but as key components of climate-resilient and ecologically grounded systems. They can contribute to nature-based or hybrid grey–green solutions when their design protects or restores ecosystem functions and delivers measurable biodiversity and human well-being benefits (Tarolli et al., 2026).. Supplemental irrigation—the application of small amounts of water at critical crop growth stages in predominantly rainfed systems—has been shown to more than double grain yield per drop in dryland farming systems across China, India, Iraq, Morocco, and Uzbekistan (Nangia et al., 2018; Devkota et al., 2023), demonstrating that the strategic use of irrigation can stabilize rainfed production under increasing climatic variability without transitioning to fully irrigated, input-intensive systems. Water harvesting can provide an ecosystem-based option at the rainfed–irrigated interface. Tarolli et al. (2026) co-authored a comprehensive review of nature-based solutions for soil and water conservation in an era of climate extremes, highlighting the role of rainwater management in rainfed systems.

Piemontese et al. (2020), in a global analysis of water harvesting potential, estimated the worldwide applicability of water harvesting from successful case studies, showing that these approaches can bridge the gap between rainfed vulnerability and irrigated stability without the environmental costs of conventional large-scale irrigation infrastructure. Villani and Castelli (2025) used a participatory modeling approach to explore storage strategies that combine large dams and small reservoirs in the context of climate change to study their complementarity providing the spatial planning tools needed to integrate water harvesting into agroecological landscape design.

Conversely, agroecological practices can reduce irrigation water demand through multiple mechanisms, including improved soil water retention, increased organic matter, diversified cropping systems with lower water requirements, and enhanced soil structure (Mdee et al., 2019; Basche and Edelson, 2017; Çakmakçı, 2025). This bidirectional relationship—irrigation supporting agroecological practices, and agroecological practices reducing irrigation dependency—represents a virtuous cycle that has been insufficiently studied or exploited.

Towards Multiservice Irrigation: A Conceptual Framework for Reconciliation

Leauthaud and Leenhardt (2025) proposed multiservice irrigation as a paradigm to reconcile water management with agroecological goals. In this framework, irrigation is planned and applied not merely to support yield and biomass production, but to enhance ecosystem functions essential for sustainable food production. Multiservice irrigation is based on the interaction between the operational aspects of the irrigation system—including its configuration, control, and irrigation amount—and agroecological practices, to enhance the ecological functions of soil and plants and generate a range of ecosystem services (Leauthaud and Leenhardt, 2025). This concept provides a valuable foundation for the agenda advanced here. Sociohydrology extends it by treating irrigation and drainage as interventions in coupled human–water systems, where policy, technology, farmer responses, allocation, and ecosystem change co-evolve (Liu et al., 2014, 2015; Han et al., 2017; Tian et al., 2026).

The multiservice irrigation framework identifies seven principles shared between agroecology and irrigation science: recycling/circularity, input reduction/efficiency, land and natural resource governance, participation, innovation, and knowledge sharing (Leauthaud & Leenhardt, 2025; Wezel et al., 2020; ICID, 2017; Tardieu, 2005; Ostrom, 1993). By embedding the remaining agroecological principles—soil health, biodiversity, synergy, economic diversification, social values and diets, fairness, and connectivity—into irrigation system planning, the framework envisions irrigation as a means of providing a plurality of ecosystem services.

This conceptual framework has parallels in the broader literature on multifunctional agriculture and ecological intensification. Rasmussen et al. (2024) demonstrated in *Science* that diversified agriculture delivers joint environmental and social benefits, while Nika et al. (2020) argued for integrating circular economy principles into water systems. Okiria et al. (2021), in a review published in *Sustainability*, examined the potential for payment for ecosystem services (PES) from the operation of agricultural water control structures, arguing that irrigation and drainage infrastructure can be managed to deliver bundles of ecosystem services beyond agricultural production—including flood regulation, biodiversity habitat, and cultural services—if appropriate economic instruments are deployed.

Furthermore, these multiservice functions are not passive benefits of physical infrastructure but require active, labor-intensive management by local institutions. In the Kotsu irrigation project in Aichi Prefecture, Japan, Otsuka et al. (2025) used the number of gate operations as a quantitative indicator of management effort. They found that while irrigation-related operations remained stable despite mosaic-like agricultural land loss, total gate operations

surged from 3,358 to 4,974 times between past and present periods due to increased flood-control operations. This demonstrates that multi-purpose water management is an active, human-sustained ecosystem service.

Drainage as an agroecological tool

While the irrigation–agroecology interface has begun to receive attention, the role of drainage in agroecological transitions remains even more underexplored. Controlled drainage, managing the depth and timing of subsurface drainage water,—has been shown to reduce nitrate losses to receiving waters by 30–50% while maintaining or improving crop yields (reviewed in Skaggs et al., 2012; and more recently in ecosystem service assessments by Mitchell et al., 2023). Denitrification bioreactors and saturated buffers installed at the edge of tile-drained fields can remove 25–98% of nitrate from drainage water before it reaches surface waters (Christianson et al., 2017), representing a nature-based solution that aligns drainage infrastructure with water quality and ecosystem service objectives.

Controlled drainage also offers potential for climate change mitigation. By maintaining higher water tables during fallow periods, controlled drainage can reduce organic matter decomposition and preserve soil carbon in drained organic soils (D'Acunha, B., et al., 2026). The reuse of drainage water for supplemental irrigation—a practice documented in arid and semi-arid regions—represents a form of agricultural water circularity that aligns with both irrigation efficiency and agroecological principles (Nika et al., 2020). These drainage innovations have rarely been evaluated within an explicit agroecological framework. A credible agenda must also track waterlogging, salinity, leaching requirements, salt disposal, energy use, and downstream water quality (Zhang et al., 2014).

The Irrigation Efficiency Paradox and Its Agroecological Implications

Any discussion of irrigation within agroecological transitions must contend with the irrigation efficiency paradox documented by Grafton et al. (2018) in *Science*. Increases in irrigation efficiency at the farm scale frequently lead to increased water consumption at the basin scale, as farmers expand irrigated area or switch to higher-value, more water-intensive crops—a rebound effect that undermines water conservation objectives. Zhang et al. (2014) documented this phenomenon in the Tarim River basin, where field-scale water-saving irrigation had complex effects on oasis groundwater and salinity. Zhao et al. (2026) extended this analysis to the Lancang–Mekong basin, showing that climate change and irrigation expansion interact to reshape water pressure in ways that local efficiency gains alone cannot resolve.

This rebound framing, however, is not without a challenge. A more direct mechanistic view holds that improved irrigation efficiency reduces the volume of water withdrawn from surface and groundwater sources per unit of crop produced, and that this reduction in withdrawal is the more fundamental and measurable effect of efficiency gains. Under this view, basin scale increases in consumption observed in some studies may reflect confounding factors like policy incentives, market-driven cropping shifts, or expanding irrigated area for reasons independent of efficiency improvements rather than a direct causal rebound triggered by efficiency itself. Reconciling these perspectives requires distinguishing between water withdrawal (which efficiency gains tend to reduce) and water consumption or depletion at the basin scale (which can rise for reasons only partially linked to on-farm efficiency), a distinction that is not always made explicit in the rebound-effect literature.

This paradox has profound implications for the agroecological transition: *if improved irrigation efficiency simply enables more intensive production, it may run counter to agroecological goals of input reduction and resource stewardship*. Addressing it requires basin-scale limits on consumptive use and irrigated-area expansion, accounting for return flows, and coordinated water–land policy rather than efficiency targets alone (Liu et al., 2014, 2015; Leauthaud and Leenhardt, 2025).

Furthermore, the single-dimensional indicator ignores local hydrological cycles where water is recycled, alongside a vast network of positive externalities, such as flood mitigation, groundwater recharge, or ecosystem conservation, valued at 48.6 billion USD annually in the Japan case (Science Council of Japan, 2001). To reconcile this paradox, global monitoring frameworks must transition toward a comprehensive water valuation that formally incorporates these positive externalities.

Policy and Economic Instruments: Enabling the Transition

Current policy frameworks often compartmentalize irrigation and agroecology, treating them as separate issues managed by different government departments, supported by different donor mechanisms, and evaluated against different performance indicators (Leauthaud et al., 2025; Leauthaud & Leenhardt, 2025). This compartmentalization is a structural barrier to the integrated approach needed.

Recent policy literature offers pathways forward. Das et al. (2025) highlighted the role of policy, technology, and innovation pathways in achieving resource resilience in water management. The World Bank's 2025 Policy Compendium on repurposing agricultural support recommended reorienting subsidies from input subsidies to conditional incentives that reduce water use per unit of output and improve environmental outcomes (World Bank, 2025). Okiria et al. (2021) argued that payment for ecosystem services from agricultural water control structures could create economic incentives for managing irrigation and drainage infrastructure to deliver multiple ecosystem services, though they noted that PES schemes in agricultural water remain rare and geographically limited. Timpanaro et al. (2026) examined policy frameworks supporting agroecology in the Mediterranean. Sociohydrological evidence further shows that societal values and governance structures co-evolve and can enable or constrain sustainability transitions (Wei et al., 2023).

A critical research priority is analyzing and designing public policies that simultaneously advance sustainable irrigation and agroecological transitions. This includes scrutinizing existing policy instruments to determine whether they inadvertently favor conventional, high-input agricultural models, and how they could be reformed. Policies that link water access to agroecological practice adoption, spatial planning of irrigation systems to reflect both resource availability and local needs, and multi-scalar instruments reconciling private and public interests represent promising directions. The ICID community, with its established connections to water ministries, irrigation agencies, private industry partners and professional networks across more than 90 countries, is uniquely positioned to advance this policy agenda.

Research Priorities for Irrigation, Drainage, and the Agroecological Transition

Based on the gaps identified in the literature review and the collective expertise of the Question 66 authorship team, we propose six research priorities that complement the frontier themes outlined by Leauthaud and Leenhardt (2025). Hungary is trying to find creative ways to utilize irrigation a drainage system for water retention and/or water resupply, by setting up new schedule of operation. Benefit of the new schedule is storing water in the ground, and raising the groundwater level hopefully will reduce the water demand of irrigation. (Szamosvari, 2026) While their themes addressed the multiservice irrigation concept from a primarily conceptual and Mediterranean-irrigation perspective, our priorities emerge from the practical, technological, hydrological, and institutional challenges faced by irrigation and drainage professionals across diverse geographic and developmental contexts—from precision-irrigated systems in the American Midwest to water-harvesting landscapes in sub-Saharan Africa, from oasis agriculture in Central Asia to rice-based systems in South and Southeast Asia.

Priority 1: Precision and variable-rate irrigation as enablers of agroecological diversification

Variable-rate irrigation (VRI) and site-specific fertigation technologies, developed primarily for conventional monoculture systems, have not been systematically evaluated for their potential to enable agroecological diversification at the sub-field scale. Furthermore, in what field variability threshold justifies VRI technology implementation to improve crop water productivity and conserve water resources and other inputs needs additional research. Sharma and Irmak (2020; 2021a, b) demonstrated the economic viability of VRI and fertigation as compared with uniform-rate management, while showing that soil-specific VRI and variable-rate fertigation can reduce irrigation and fertilizer inputs while maintaining crop productivity. Sharda et al. (2022) further demonstrated that crop water stress can be mapped at the sub-field scale, providing a basis for spatially targeted irrigation management. However, these capabilities have been deployed almost exclusively within input-intensive cropping systems. A critical research need is to adapt and evaluate precision irrigation technologies for diversified, multi-species cropping systems—including intercropping, agroforestry, and relay cropping—where water demand varies not only spatially but also temporally by crop species and growth stage within the same field. This would require new sensor configurations, decision-support algorithms, and irrigation scheduling protocols that account for the complexity of polycultures rather than the uniformity of monocultures. Irmak (2015) and Irmak (2024) have advanced the understanding of maize response to different subsurface drip and sprinkler irrigation management strategies, providing the kind of crop-specific ET and yield response data needed for each component species in diversified systems.

Priority 2: Hydrological consequences of agroecological transitions in irrigated landscapes at the basin scale

The irrigation efficiency paradox (Grafton et al., 2018) demonstrates that field-scale water savings, in some cases, may not necessarily translate to basin-scale water conservation. Zhang et al. (2014) showed that water-saving irrigation in the Tarim oasis had complex effects on groundwater dynamics, and Zhao et al. (2026) documented how climate change and irrigation expansion are reshaping basin-scale water pressure. Yet no comparable studies exist for the hydrological consequences of agroecological transitions in irrigated landscapes. If a conventionally irrigated watershed transitions to agroecological management—incorporating cover crops, diversified rotations, conservation (reduced) or no-tillage, and organic matter amendments—what are the cumulative effects on evapotranspiration, groundwater recharge, return flows, and downstream water availability? This requires coupled sociohydrological–agronomic models that represent hydrology, crop decisions, policy, technology adoption, land expansion, and feedbacks across scales (Liu et al., 2014, 2015; Han et al., 2017). Evaluation should report consumptive use, return flows, groundwater, salinity, equity, and downstream effects against explicit counterfactuals.

Priority 3: Water harvesting and small-scale storage as nature-based solutions for rainfed-to-irrigated transitions

In many dryland regions, the agroecological transition involves moving from fully rainfed to partially irrigated systems through supplemental irrigation fed by water harvesting rather than conventional irrigation infrastructure. Villani et al. (2025) and Tarolli et al. (2025) have advanced understanding of nature-based solutions for soil and water conservation (restoring wetlands and riparian buffer (cited by Tarolli et al. (2025) for water regulation) in the context of climate extremes, while Piemontese et al. (2020) estimated the global potential of water harvesting based on successful case studies. Typical examples of rainwater harvesting practices are dugout ponds, used to collect and store rainwater within the farmland for supplementary irrigation during dry periods (Liniger and Mekdaschi Studer, 2019). Other widespread practices are terraces, built on steep terrains to slow down runoff and increase infiltration and traditionally

used in the Latin American, African and Asian highlands (Denevan, 2003, Mekdaschi Studer and Liniger, 2018, Saiz et al., 2016, Stroosnijder, 2009). Using participatory modeling approach, Castelli and Villani et al. (2025) demonstrated how large dams and small reservoirs can be co-modelled as complementary storage strategies under climate change. However, the role of water harvesting in enabling agroecological transitions—particularly the design of small-scale storage systems that support diversified cropping, livestock integration, and landscape-scale ecosystem service provision—remains underexplored. Research is needed to: (i) quantify the water-harvesting potential for supplemental irrigation of diversified cropping systems across agroecological zones; (ii) evaluate the ecosystem service co-benefits of small reservoirs and water-harvesting structures (biodiversity, carbon sequestration, sediment retention); and (iii) develop participatory planning tools that integrate water harvesting into agroecological landscape design.

Priority 4: Economic instruments and institutional innovation for irrigation–agroecology integration

The institutional and economic dimensions of integrating irrigation and agroecology have received far less attention than the biophysical dimensions. Okiria et al. (2021) reviewed the potential for payment for ecosystem services (PES) from agricultural water control structures, finding that while the concept is promising, PES schemes in agricultural water remain rare and geographically concentrated. Kawasaki's research on agricultural water infrastructure management in Japan (Kawasaki et al., 2024) and on the ecosystem service bundles provided by irrigation canal networks offers a framework for rethinking how irrigation and drainage infrastructure is valued, financed, and governed. Research is needed to: (i) develop and test economic instruments that reward irrigation and drainage operators for ecosystem service provision alongside water delivery; (ii) design water governance arrangements that bridge the institutional divide between irrigation agencies and agroecology promotion bodies; and (iii) evaluate the role of multi-stakeholder platforms in fostering the joint management of irrigation and agroecological systems, building on the participatory approaches documented by Pahl-Wostl et al. (2008) and Ameur and Leauthaud (2024).

Priority 5: Soil-water dynamics and water productivity under conservation agriculture–irrigation interactions

The interaction between conservation agriculture (CA) practices—zero-till, cover cropping, residue retention—and irrigation management is biophysically complex and context-dependent. Recognition and understanding of impacts of any crop and (or) soil management practice on crop water use is equally crucial as its intended impacts. One such practice that has gained adoption among producers in U.S. maize growing regions is conservation tillage, which aims to maintain about 30–40%, or more, of residual vegetative cover on the soil surface after planting. The presence of numerous interacting factors suggests that the success of this practice depends on local conditions, requiring scientific/research-based data (Irmak et al., 2019). Through extensive field research, Irmak et al. (2019) quantified crop evapotranspiration (ET_c), microclimate, yield, water productivity (WP) and other variables for irrigated maize (*Zea mays* L.) under disk-till (DT) (conventional) and no-till (NT) (conservation) tillage systems in 2011, 2012 and 2013 in two carefully managed and monitored producers' fields, which have been under these tillage management practices for over 17 years. Over the three-year total, DT maize ET_c (2091 mm) was 92 mm higher than NT maize ET_c (1,999 mm). A seasonal and monthly pattern existed in the difference between DT and NT ET_c. NT maize had less pre-anthesis water use than DT maize and greater post-anthesis water use than DT maize in all three growing seasons. Maize yield was higher for DT maize than NT maize in all three years, by 7% (0.8 t/ha), 6% (0.8 t/ha), and 10% (1.2 t/ha) in 2011, 2012, and 2013, respectively. While the research was not designed agroecological services in mind explicitly, it implicitly demonstrated an important conservation practice that can lead

to additional water resources conservation that can contribute to the agroecological services for other vegetation services and habitats. Kukal and Irmak (2021) reviewed CA effects on soil water holding capacity and water savings, finding that effects varied with management practices and agroecological conditions. Kienzler et al. (2012) demonstrated that CA under irrigation in Central Asia altered water use patterns, while Mohammad et al. (2018) found reduced water consumption under direct-seeded rice with CA in the Indo-Gangetic Plains. However, these studies were not designed within an explicit agroecological framework, and the interactive effects between specific irrigation and drainage strategies (e.g., deficit irrigation, supplemental irrigation, controlled drainage) and specific CA practices (e.g., cover crop species, residue management, tillage intensity) remain poorly quantified across diverse soil types, climates, and cropping systems. Systematic field experimentation and modelling are needed to: (i) determine how CA practices alter soil-water dynamics in ways that require irrigation scheduling adjustments; (ii) quantify the water productivity gains (or losses) from combining CA with precision irrigation; and (iii) identify the conditions under which CA can reduce irrigation water demand without compromising yield stability under climate variability.

Priority 6: Modernizing irrigation and drainage infrastructure for multifunctionality and ecosystem service delivery

Much of the world's irrigation and drainage infrastructure was designed for a single purpose: *delivering water to crops or removing excess water from fields*. The concept of multifunctional infrastructure—designing and managing irrigation and drainage systems to deliver water for agriculture while simultaneously providing ecosystem services, supporting biodiversity, regulating floods, and sequestering carbon—is still in its infancy. The ICID Vision 2030 roadmap (ICID, 2017) recognized principles of integrated water management, innovation, and governance that align with agroecological principles, but operationalizing these principles in infrastructure design and management remains a frontier. The evidence base should connect hydraulic performance with ecological, social, and governance outcomes.. Research is needed to: (i) develop design criteria and performance indicators for multifunctional irrigation and drainage infrastructure; (ii) evaluate the costs and benefits of retrofitting existing infrastructure for ecosystem service provision; and (iii) assess the governance and financing arrangements needed to support infrastructure modernization that serves both agricultural production and agroecological goals.

Why the ICID Congress Must Address This Gap

The 26th ICID Irrigation and Drainage Congress in Marseille provides a unique and timely platform to address the knowledge gap between irrigation/drainage and agroecology for several reasons:

- First, ICID is the historically leading, reputable international professional organization for irrigation, drainage, and flood management, with a membership spanning over 90 countries. Its convening power can bring together the irrigation and agroecology communities in a way that few other platforms can.
- Second, the Congress theme explicitly invites researchers, practitioners, and policymakers to explore how irrigation, drainage, and nature-based water solutions—when guided by agroecological principles—can help build sustainable, inclusive, and resilient food systems to feed the world's rapidly increasing population. When the two critical and interconnected disciplines (irrigation/drainage and agroecology) are considered together, they can enable developing practical management solutions to minimize the negative impact(s) of climate change on agroecological productivity to sustain food and fiber production. This framing already bridges the disciplinary divide, which is more needed than ever before.

- Third, the ICID Vision 2030 roadmap recognizes principles of integrated water management, innovation, knowledge sharing, equity, and governance that are shared with the 13 principles of agroecology (ICID, 2017; Wezel et al., 2020). The alignment is structural, not merely thematic.
- Fourth, the Congress convenes at a moment when climate change is reshaping, in challenging ways, the context for irrigation and drainage worldwide. The IPCC's Sixth Assessment Report (2023) has made clear that incremental adaptation is insufficient; transformative change in food systems is required. Irrigation and drainage, repositioned within an agroecological framework, can be, and should be, part of that transformation.
- Finally, the Congress can catalyze the research agenda. The six research priorities identified above require coordinated, multi-disciplinary, multi-scale research that the ICID network is uniquely positioned to mobilize—linking irrigation engineers, agronomists, hydrologists, ecologists, social scientists, and policymakers across countries and contexts. The Question 66 team is well positioned to support such integration across engineering, agronomy, hydrology, ecology, social science, and policy.

Conclusion

The links between agroecology and irrigation and drainage remain profoundly underexplored: as of April 2023, only 38 scientific articles explicitly connect them, and most do so superficially (Leauthaud et al., 2025) and without full understanding of their interconnectivity for the sustainability of agricultural productivity, food security as well as agroecological services. This scarcity represents both a gap and an opportunity. The gap is that farmers, policymakers, and researchers lack the evidence base needed to design irrigation and drainage systems that actively contribute to agroecological transitions. The opportunity is that the field is wide open for innovative, integrative research that can redefine the role of water management in sustainable food systems.

Climate change has made this reconciliation urgent. Irrigation and drainage should be assessed along a continuum from conventional grey infrastructure to hybrid and ecosystem-based measures; only the latter two qualify as nature-based solutions when ecological and social outcomes are demonstrated.. The multiservice irrigation concept (Leauthaud and Leenhardt, 2025) provides a valuable conceptual framework for this repositioning, while the six research priorities we propose in this paper translate that concept into a practical agenda grounded in the technological, hydrological, institutional, and ecological challenges that the global irrigation and drainage community confronts daily.

The 26th ICID Congress in Marseille is positioned to be a turning point on this agenda. By bringing together the irrigation and agroecology communities, the Congress can catalyze the research, policy, and practice innovations needed to ensure that agricultural water management, agricultural production and related management practices become an integral, transformative component of the agroecological transition—building food systems that are not only productive and water-efficient, but also ecologically grounded, socially equitable, and climate-resilient.

References

- Akakpo, K., S. Bouarfa, M. Benoit, and C. Leauthaud. 2021. Challenging agroecology through the characterization of farming practices' diversity in Mediterranean irrigated areas. *European Journal of Agronomy* 128: 126284. doi: 10.1016/j.eja.2021.126284.

- Alletto, L., Cueff, S., Bréchemier, J., Lachaussée, M., Derrouch, D., Page, A., ... & Bustillo, V. (2022). Physical properties of soils under conservation agriculture: A multi-site experiment on five soil types in south-western France. *Geoderma*, 428, 116228.
- Altieri, M.A. 1992. Agroecological foundations of alternative agriculture in California. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 39(1–2): 23–53. doi: 10.1016/0167-8809(92)90203-N.
- Ameur, F., and C. Leauthaud. 2024. Assessing the integration of agroecological principles in smallholder farming systems in North African irrigated plains. *Agroecology and Sustainable Food Systems*. doi: 10.1080/21683565.2024.2417266.
- Basche, A.D., and O.F. Edelson. 2017. Improving water resilience with more perennially based agriculture. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 41(7): 799–824. doi: 10.1080/21683565.2017.1330795.
- Çakmakçı, R., S. Çakmakçı, and M.F. Çakmakçı. 2025. Principles of environmentally sustainable agriculture for building resilient and resource-efficient food systems. *Turkish Journal of Biology* 49(5): 550–584. doi: 10.55730/1300-0152.2764.
- Christianson, L., A. Brij, A. Carvalho, and J. Helmers. 2017. Reducing nitrogen contamination from agricultural subsurface drainage with denitrification bioreactors and controlled drainage. *Biosystems Engineering* 153: 1–10.
- Das, A., and S. Mishra. 2025. Smart and sustainable water management: policy, technology, and innovation pathways for resource resilience. *Green Technology, Resilience and Sustainability* 5 (2025). <https://doi.org/10.1007/s44173-025-00022-8>
- Devkota, M., K.P. Devkota, M. Karrou, and V. Nangia. 2023. Genotype and agronomic management interaction to enhance wheat yield and water use efficiency in the Mediterranean rainfed environment of Morocco: I. Field data analysis. *European Journal of Agronomy* 151: 126972. doi: 10.1016/j.eja.2023.126972.
- D'Acunha, B., et al. 2026. Drained agricultural peatlands as persistent carbon sources. (PMC12970578) — a review of drained organic soils as carbon sources.
- W.M. Denevan. 2003. *Cultivated Landscapes of Native Amazonia and the Andes* Oxford University Press.
- Devkota, K.P., M. Devkota, M. Mabhaudhi, V. Nangia, S. Attaher, R.J. Boroto, J. Timsina, and K.H. Siddique. 2025. A blueprint for building resilience and food security in MENA and SSA drylands: Diversifying agriculture with neglected and underutilized species. *Food and Energy Security* 14(1): e70046. doi.org/10.1002/fes3.70046.
- FAO. 2018. *The 10 Elements of Agroecology: Guiding the Transition to Sustainable Food and Agricultural Systems*. FAO. Rome, Italy.
- FAO. 1996. Food production: the critical role of water. *Technical Background Document*. FAO. Rome, Italy.
- Fischer, K., G. Vico, H. Röcklinsberg, H. Liljenström, and R. Bommarco. 2025. Progress towards sustainable agriculture hampered by siloed scientific discourses. *Nature Sustainability* 8: 66–74.
- Galeana-Pizana, J.M., S. Couturier, D. Figueroa, and A.D. Jimenez. 2021. Is rural food security primarily associated with smallholder agriculture or with commercial agriculture? *Agricultural Systems* 190: 103091. doi: 10.1016/j.agsy.2021.103091.
- Grafton, R.Q., J. Williams, C.J. Perry, F. Müller, C. Ringler, A. Steduto, B. Udall, S.A. Wheeler, Y. Wang, D. Garrick, and S.M. Allen. 2018. The paradox of irrigation efficiency. *Science* 361(6404): 748–750. doi: 10.1126/science.aat9314.
- Gross, B., and R. Jaubert. 2019. Vegetable gardening in Burkina Faso: drip irrigation, agroecological farming and the diversity of smallholders. *Water Alternatives* 12(1): 46–67.
- Guzman, G.I., and A.M. Alonso. 2008. A comparison of energy use in conventional and organic olive oil production in Spain. *Agricultural Systems* 98(3): 167–176. doi: 10.1016/j.agsy.2008.06.004.
- Han, S., F. Tian, Y. Liu, and X. Duan. 2017. Socio-hydrological perspectives of the co-evolution of humans and groundwater in Cangzhou, North China Plain. *Hydrology and Earth System Sciences* 21: 3619–3633. doi: 10.5194/hess-21-3619-2017.
- HLPE. 2019. *Agroecological and Other Innovative Approaches for Sustainable Agriculture and Food Systems That Enhance Food Security and Nutrition*. HLPE Report #14. Rome: Committee on World Food Security.
- ICID. 2017. *A Water Secure World Free of Poverty and Hunger: A Roadmap to ICID Vision 2030*. New Delhi: ICID.
- Irmak, S., S. Irmak and J. Kaur. 2025. Sprayable bio-based polymer conserved soil-water, enhanced soybean growth, moderated soil temperature, increased soil organic matter content and reduced giant foxtail [*Setaria faberi* hermm.] density and biomass. *Applied Engineering in Agriculture*. 41(6):695-706. <https://doi.org/10.13031/aea.16439>.

- Irmak, S., J. Aguilar, V. Adamchuk, H. Huang, S. O'shaughnessy, M. Kukal, I. Kisekka, D. Porter, M. Andrade-Rodriguez, A. Yari, C. Madramootoo. 2025. Precision Irrigation Management. *The Council for Agricultural Science and Technology (CAST) Paper*. pp. 1-21. <https://doi.org/10.62300/6b9hf011>.
- Irmak, S., T.A. Hinn, M.S. Kukal and A.T. Mohammed. 2025. Concurrent response of soybean to fixed (full and limited) and variable rate irrigation management in three soil types: I. Soil water dynamics. *Irrigation and Drainage*. 74:1853–1873. <https://doi.org/10.1002/ird.3124>.
- Irmak, S., and T.A. Hinn. 2025. Concurrent response of soybean to fixed (full and limited) and variable rate irrigation management in three soil types: II. Growth, yield, evapotranspiration and water productivity. *Irrigation and Drainage*. 74:1874–1888. <https://doi.org/10.1002/ird.3121>.
- Irmak, S. 2024. Maize response to different subsurface drip irrigation management strategies: Yield, production functions, basal and crop evapotranspiration. *Agricultural Water Management* 300 (2024) 108927. doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108927.
- Irmak, S., S. Irmak and J. Kaur. 2024. Effect of sprayable biobased polymers on soybean growth and yield, weed suppression, soil temperature, soil-water, evapotranspiration and soil quality variables. *Journal of Natural Resources and Agricultural Ecosystems*. 2(4):227-242. <https://doi.org/10.13031/jnrae.16177>.
- Irmak, S. 2023. Agriculture and agricultural water management: Historical perspectives and integration of research and extension/outreach for large-scale technology adoption in production fields. *Journal of ASABE*. 66(1):167-192. <https://doi.org/10.13031/ja.15272>.
- Irmak, S., A.T. Mohammed and M. Drudik. 2023. Maize nitrogen (N) uptake, grain N concentration and root-zone residual nitrate N (NO₃-N) response under center pivot, subsurface drip and surface (furrow) irrigation. *Agricultural Water Management* 287(2023)108421. doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108421.
- Irmak, S., and A.T. Mohammed. 2023. Maize nitrogen uptake and use efficiency, partial factor productivity of nitrogen, and yield response to different nitrogen and water applications under three irrigation methods. *Irrigation and Drainage*. 73:64-88. <https://doi.org/10.1002/ird.2868>.
- Irmak, S., A.T. Mohammed and M.S. Kukal. 2022. Maize response to coupled irrigation and nitrogen fertilization under center pivot, subsurface drip and surface or gravity (furrow) irrigation: Growth, development and productivity. *Agricultural Water Management*. 263(2022):107457. doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107457.
- Irmak, S., M.S. Kukal, A.T. Mohammed and K. Djaman. 2019. Disk-till vs. no-till maize evapotranspiration, microclimate, grain yield, production functions and water productivity. *Agricultural Water Management*. 26(5):177-195. doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.006.
- Irmak, S., V. Sharma, A.T. Mohammed and K. Djaman. 2018. Impacts of cover crops on soil physical properties: Field capacity, permanent wilting point, soil-water holding capacity, bulk density, hydraulic conductivity and infiltration. *Transactions of the ASABE*. 61(4):1307-1321. doi.org/10.13031/trans.12700.
- Irmak, S., and K. Djaman. 2016. Effects of planting date and density on plant growth, yield, evapotranspiration, and irrigation- and evapotranspiration-yield production functions of maize (*Zea mays* L.) under subsurface drip irrigation and rainfed conditions. *Transactions of the ASABE*. 59(5):1235-1256. [doi:10.13031/trans.59.11169](https://doi.org/10.13031/trans.59.11169).
- Irmak, S., J.E. Specht, L. Odhiambo, J.M. Rees and K.G. Cassman 2015. Soybean yield, water productivity, evapotranspiration and soil-water extraction response to subsurface drip irrigation. *Transactions of the ASABE*. 57(3):729-748. [doi:10.13031/trans.57.10085](https://doi.org/10.13031/trans.57.10085).
- Irmak, S. 2015. Inter-annual variation in long-term center pivot-irrigated maize evapotranspiration (ET) and various water productivity response indices: Part I. Grain yield, actual and basal ET, irrigation-yield production functions, ET-yield production functions, and yield response factors. *J. Irrigation and Drainage Engineering*. 141(5):1-17. [doi:10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000825](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000825).
- IPCC. 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Geneva: IPCC. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- Kawasaki, K., Ide, K., Yamamuro, N., Oda, T., Matsumura, A., Noda, K., Hanasaki, N., Hirabayashi, Y. 2024. Considering the irrigation canal network in Japan: an attempt to model inter-basin water conveyance. *Japanese Journal of JSCE* 80(16): 1-7. doi:10.2208/jscej.23-16095.
- Kienzler, K.M., J.P.A. Lamers, A. McDonald, A. Mirzabaev, N. Ibragimov, O. Egamberdiev, E. Ruzibaev, and A. Akramkhanov. 2012. Conservation agriculture in Central Asia—What do we know and where do we go from here? *Field Crops Research* 132: 95–105. doi: 10.1016/j.fcr.2011.12.008.
- Kröger, R. et al. 2023. A review of ecosystem services from edge-of-field practices in tile-drained agricultural landscapes. *Journal of Environmental Management* 348: 119220. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119220.

- Kukal, M.S., and S. Irmak. 2021. Conservation agriculture effects on soil water holding capacity and water-saving varied with management practices and agroecological conditions: A review. *Agriculture* 11(9): 1681. doi: 10.3390/agriculture11091681.
- Leauthaud, C., F. Ameer, and D. Leenhardt. 2025. Irrigation and agroecology: a scientific mismatch? A literature review. *Agroecology and Sustainable Food Systems*. 49(9), 1415–144. doi: 10.1080/21683565.2025.2481405.
- Leauthaud, C., and D. Leenhardt. 2025. Towards multiservice irrigation for an agroecological future. *npj Sustainable Agriculture* 3: 55. doi: 10.1038/s44264-025-00094-w.
- Leauthaud, C., F. Ameer, A. Richa, J. Ben Yahmed, N. Tadjer, S. Bakouchi, K. Akakpo, M. Djezzar, and H. Amichi. 2022a. Production and use of homemade dry manure-based tea in fertigation systems in North Africa. *Renewable Agriculture and Food Systems* 37(3): 248–256. doi: 10.1017/S174217052100051X.
- Leauthaud, C., J. Ben Yahmed, M. Husseini, F. Rezgui, and F. Ameer. 2022b. Adoption factors and structural characteristics of irrigated olive grove agroforestry systems in Central Tunisia. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 46(7): 1025–1046. doi: 10.1080/21683565.2022.2085230.
- Liniger, H., Mekdaschi Studer, R., 2019. Sustainable Rangeland Management in Sub-Saharan Africa: Guidelines to Good Practice (No. 138574), HP and Mekdaschi Studer, R. The World Bank.
- Liu, D., F. Tian, M. Lin, and M. Sivapalan. 2015. A conceptual socio-hydrological model of the co-evolution of humans and water: Case study of the Tarim River basin, western China. *Hydrology and Earth System Sciences* 19: 1035–1054. doi: 10.5194/hess-19-1035-2015.
- Liu, Y., F. Tian, H. Hu, and M. Sivapalan. 2014. Socio-hydrologic perspectives of the co-evolution of humans and water in the Tarim River basin, Western China: The Taiji–Tire model. *Hydrology and Earth System Sciences* 18: 1289–1303. doi: 10.5194/hess-18-1289-2014.
- Lu, Y., F. Tian, L. Guo, et al. 2021. Socio-hydrologic modeling of the dynamics of cooperation in the transboundary Lancang–Mekong River. *Hydrology and Earth System Sciences* 25: 1883–1903. doi: 10.5194/hess-25-1883-2021.
- Mdee, A., A. Wostry, A. Coulson, and J. Maro. 2019. A pathway to inclusive sustainable intensification in agriculture? Assessing evidence on the application of agroecology in Tanzania. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 43(2): 201–227. doi: 10.1080/21683565.2018.1485126.
- Mekdaschi, R. and Liniger, H.P., 2013. Water harvesting: guidelines to good practice.
- Mitchell, M. E., Newcomer-Johnson, T., Christensen, J., Crumpton, W., Dyson, B., Canfield, T. J., ... & Forshay, K. J. (2023). A review of ecosystem services from edge-of-field practices in tile-drained agricultural systems in the United States Corn Belt Region. *Journal of environmental management*, 348, 119220.
- Mohammad, A., S. Sudhishri, T.K. Das, M. Singh, R. Bhattacharyya, A. Dass, M. Khanna, V.K. Sharma, N. Dwivedi, and M. Kumar. 2018. Water balance in direct-seeded rice under conservation agriculture in north-western Indo-Gangetic Plains of India. *Irrigation Science* 36(6): 381–393. doi: 10.1007/s00271-018-0590-z.
- Mohammed, A.T., and S. Irmak. 2022. Maize response to irrigation and nitrogen under center pivot, subsurface drip and furrow irrigation: Water productivity, production functions, basal evapotranspiration and yield response factors. *Agricultural Water Management*. 271(2022), 107795. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107795>.
- Moraine, M., J. Grimaldi, C. Murgue, M. Duru, and O. Therond. 2016. Co-design and assessment of cropping systems for developing crop-livestock integration at the territory level. *Agricultural Systems* 147: 87–97. doi: 10.1016/j.agry.2016.06.002.
- Murgia, I., Beltrami, S., Villani, L., Vaglia, V., Alderotti, F., Angeloni, G., ... & Piemontese, L. (2026). The challenge of science for sustainable agriculture: an Italian early career researchers' perspective. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 50(7), 1595-1603.
- Nangia, V., T. Oweis, F.H. Kemeze, and J. Schnetzer. 2018. *Supplemental Irrigation: A Promising Climate-Smart Practice for Dryland Agriculture*. Climate-Smart Agriculture Practice Brief. CGIAR CCAFS.
- Nhamo, L., et al. 2025. Transforming agricultural water management through the Water–Energy–Food Nexus: Trends, opportunities, barriers and solutions. *Irrigation and Drainage* 2025; 0:1–1. <https://doi.org/10.1002/ird.70032>.
- Nika, C.E., V. Vasilaki, A. Expósito, and E. Katsou. 2020. Water cycle and circular economy: developing a circularity assessment framework for complex water systems. *Water Research* 187: 116423. doi: 10.1016/j.watres.2020.116423.

- Okiria, E., K. Noda, M.K. Zaki, and T. Okayasu. 2021. A review of payment for ecosystem services (PES) in agricultural water: Are PES from the operation of agricultural water control structures ubiquitous? *Sustainability* 13(22): 12624. doi: 10.3390/su132212624.
- Ostrom, E. 1993. Design principles in long-enduring irrigation institutions. *Water Resources Research* 29(7): 1907–1912.
- Otsuka, K., Nishimura, S., Senge, M., Noda, K. 2025. Urbanization impacts on operational efforts of agricultural water infrastructure. *Hydrological Research Letters*, 19: 283-288. doi: 10.3178/hrl.25-00030.
- Pahl-Wostl, C., E. Mostert, and D. Tàbara. 2008. The growing importance of social learning in water resources management and sustainability science. *Ecology and Society* 13(1): 1-4. <https://www.jstor.org/stable/26267907>.
- Payero, J.O., D.D. Tarkalson and S. Irmak, D. Davison, and J.L. Petersen. 2008. Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semi-arid climate. *Agricultural Water Management*. 95:895-908.
- Perez Neira, D. 2016. Energy efficiency of cacao agroforestry under traditional and organic management. *Agronomy for Sustainable Development* 36(49). doi: 10.1007/s13593-016-0386-6.
- Piemontese, L., G. Castelli, I. Fetzer, J. Barron, H. Liniger, N. Harari, E. Bresci, and G. Cecchi. 2020. Estimating the global potential of water harvesting from successful case studies. *Global Environmental Change* 63: 102121. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102121.
- Pörtner, H.-O. et al. 2022. Technical summary. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009325844.002.
- Rasmussen, L.V. et al. 2024. Joint environmental and social benefits from diversified agriculture. *Science* 384(6691): 87–93. doi: [10.1126/science.adj19](https://doi.org/10.1126/science.adj19)
- Romero, P., J.M. Navarro, and P.B. Ordaz. 2022. Towards a sustainable viticulture: the combination of deficit irrigation strategies and agroecological practices in Mediterranean vineyards. A review and update. *Agricultural Water Management* 259: 107216. doi: 10.1016/j.agwat.2021.107216.
- Rouge, A., G. Adeux, H. Busset, R. Hugard, J. Martin, A. Matejcek, D. Moreau, J.P. Guillemin, and S. Cordeau. 2022. Weed suppression in cover crop mixtures under contrasted levels of resource availability. *European Journal of Agronomy* 136: 126499. doi: 10.1016/j.eja.2022.126499.
- Science Council of Japan. 2001. Report on the Evaluation of Multifunctional Roles of Agriculture and Forestry Contributed to Global Environment and Human Life (Response to the Ministerial Inquiry). Science Council of Japan, Tokyo, Japan. (in Japanese).
- Sharda, V., R. Bajwa, G. Shekhar, and S. Irmak. 2022. Evaluating spatial and temporal variations in sub-field level crop water stress for variable rate irrigation. *Frontiers in Agronomy* 4: 983244. doi: 10.3389/fagro.2022.983244.
- Sharma, V and S. Irmak. 2021a. Comparative analyses of variable and fixed rate irrigation and nitrogen management for maize in different soil types: Part I. Impact on soil-water dynamics and crop evapotranspiration. *Agric. Water Manage.*, 245 (28) (2021), Article 106644, 10.1016/j.agwat.2020.106644
- Sharma, V and S. Irmak. 2021b. Comparative analyses of variable and fixed rate irrigation and nitrogen management for maize in different soil types: Part II. Growth, grain yield, evapotranspiration, production functions and water productivity. *Agric. Water Manag.*, 246 (2021), 10.1016/j.agwat.2020.106653
- Sharma, V., and S. Irmak. 2020. Economic comparisons of variable rate irrigation and fertigation with fixed (uniform) rate irrigation and fertigation and pre-plant fertilizer management for maize. *Agricultural Water Management* 240: 106307. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106307.
- Sietz, D., Frey, U., Roggero, M., Gong, Y., Magliocca, N., Tan, R., Janssen, P. and Václavík, T., 2019. Archetype analysis in sustainability research. *Ecology and Society*, 24(3).
- Skaggs, R.W., M.A. Youssef, and G.M. Chescheir. 2012. DRAINMOD: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 55(4): 1509–1522. doi: 10.13031/2013.42259.
- Tardieu, H. 2005. Irrigation and drainage services: some principles and issues towards sustainability. An ICID position paper. *Irrigation and Drainage* 54: 251–262.
- Stroosnijder, L. (2009). Modifying land management in order to improve efficiency of rainwater use in the African highlands. *Soil and Tillage Research*, 103(2), 247-256.
- Tarolli, P., Liu, G., Castelli, G., Bresci, E., Bailly, J.S., Rizzo, D., Loc, H.H., Sidle, R.C. and Bogaard, T., 2025. Nature-based solutions for soil and water conservation in an era of climate extremes: Limitations and future scenarios. *International Soil and Water Conservation Research*.

- Tarolli, P., G. Castelli, et al. 2026. Nature-based solutions for soil and water conservation in an era of climate extremes: Limitations and future scenarios. *International Soil and Water Conservation Research* 14(2): 100604. doi: 10.1016/j.iswcr.2025.12.004.
- Tian, F., J. Wei, M. Haefner, and H. Kreibich, eds. 2026. *Coevolution and Prediction of Coupled Human-Water Systems: A Sociohydrologic Synthesis of Change in Hydrology and Society*. Elsevier. ISBN 978-0-443-41736-8.
- Timpanaro, G. et al. 2026. Regulatory frameworks and policy innovations for agroecology in the Mediterranean basin. *Land Use Policy* 108001. doi: 10.1016/j.landusepol.2026.108001. Van der Laan, M., Virtanen, S., Matsuno, Y., Castelli, G., Fayrap, A., Cresswell, R., & Hsieh, M. K. (2024). Ecosystem services of irrigated and controlled drainage agricultural systems: A contemporary global perspective. *Irrigation and Drainage*, 73(5), 1823-1837.
- Villani, L., and G. Castelli. 2025. Large dams and small reservoirs: co-modeling water storage strategies in a Mediterranean catchment under a changing climate. *Frontiers in Water* 7: 1673203. doi: 10.3389/frwa.2025.1673203.
- Villani, L., Castelli, G., Forzini, E., Piemontese, L., Lucca, E., Bouizrou, I., ... & Bresci, E. (2025). Large dams and small reservoirs: co-modeling water storage strategies in a Mediterranean catchment under a changing climate. *Frontiers in Water*, 7, 1673203.
- Wei, J., Y. Wei, F. Tian, Y. Xiong, and H. Hu. 2023. Transition in the societal value and governance of water resources in Australia and China. *Humanities and Social Sciences Communications* 10: 359. doi: 10.1057/s41599-023-01857-x.
- Wezel, A., M. Casagrande, F. Celette, J.-F. Vian, A. Ferrer, and J. Peigne. 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture: A review. *Agronomy for Sustainable Development* 34(1): 1–20. doi: 10.1007/s13593-013-0180-7.
- Wezel, A., B.G. Herren, R.B. Kerr, E. Barrios, A.L.R. Gonçalves, and F. Sinclair. 2020. Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems: A review. *Agronomy for Sustainable Development* 40(6): 40. doi: 10.1007/s13593-020-00646-z.
- World Bank. 2025. *Repurposing Agricultural Support: 2025 Policy Compendium*. Washington, DC: World Bank.
- Xue, R., Y. Jiang, H. Li, and B. Shi. 2025. Review of advancements and challenges in delayed irrigation: Enhancing crop water productivity and sustainable crop production. *Agricultural Water Management* 318: 109739. doi: 10.1016/j.agwat.2025.109739.
- Yonts, C.D., A. Haghverdi, D.L. Reichert and S. Irmak. 2018. Deficit irrigation and surface residue cover effects on dry bean yield, in-season soil water content and irrigation water use efficiency in western Nebraska High Plains. *Agricultural Water Management*. 199:138-147. doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.024.
- Zhang, Z., H. Hu, F. Tian, X. Yao, and M. Sivapalan. 2014. Groundwater dynamics under water-saving irrigation and implications for sustainable water management in an oasis: Tarim River basin of western China. *Hydrology and Earth System Sciences* 18: 3951–3967. doi: 10.5194/hess-18-3951-2014.
- Zhao, H., F. Tian, et al. 2026. Climate change and irrigation expansion reshape the water pressure and upstream–downstream interactions in the Lancang–Mekong River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences* 30: 2433–2453. doi: 10.5194/hess-30-2433-2026. Zwarteveen, M. et al. 2021. Transformations to groundwater sustainability: from individuals and pumps to communities and aquifers. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 49: 88–97.



QUESTION 66:**FACE AU DÉFI CLIMATIQUE, COMMENT L'IRRIGATION ET LE DRAINAGE PEUVENT CONTRIBUER À LA TRANSITION AGROÉCOLOGIQUE?****RAPPORT GENERAL**

Dr. Vinay Nangia (ICARDA)*

*Rapporteur Général***RESUME**

L'agroécologie est unanimement considérée comme un cadre de la conception des systèmes alimentaires durables portant sur des principes écologiques, mais l'irrigation et le drainage — les infrastructures de gestion de l'eau dont dépendent 40% de la production alimentaire mondiale — restent largement absentes du discours agroécologique. Une revue systématique de la littérature scientifique n'a identifié que 38 articles liant de manière explicite l'irrigation et l'agroécologie en avril 2023, la plupart traitant l'irrigation de manière superficielle plutôt que comme une composante transformatrice des systèmes agroécologiques (Leauthaud et al., 2025). Ce document de principe synthétise l'état actuel des connaissances disponibles sur le croisement de l'irrigation, du drainage et de l'agroécologie, et soutient que les fossés disciplinaires entre ces domaines n'est plus défendable dans le contexte du changement climatique, et propose que l'irrigation et le drainage soient évalués en tant qu'interventions multiservices au sein de systèmes couplés « humains-eau », en distinguant les infrastructures conventionnelles des mesures hybrides grises-vertes et basées sur l'écosystème. Nous nous appuyons sur les preuves émergentes issues de l'irrigation de précision et à débit variable, de l'irrigation déficitaire, des interactions entre agriculture de conservation et irrigation, du drainage contrôlé, de la collecte de l'eau et des systèmes de culture irrigués diversifiés dans divers contextes géographiques et institutionnels — depuis des plaines indo-gangétiques et du bassin du Tarim jusqu'à la Méditerranée, l'Afrique subsaharienne et le Midwest américain. En nous appuyant sur l'expertise collective de l'équipe co-responsable de la Question 66, nous proposons six priorités de recherche qui émergent des lacunes identifiées dans la littérature et des défis pratiques auxquels sont confrontés les professionnels de l'irrigation et du drainage à travers le monde. Nous concluons que le 26^e Congrès de la CIID fournit une plate-forme essentielle pour combler ces lacunes en matière de connaissances et pour repositionner l'irrigation et le drainage en tant que composantes intégrales de systèmes alimentaires fondés écologiquement et résistants au climat.

Mots-clés : Agroécologie; Irrigation; Drainage; Irrigation à service multiple; Solutions fondées sur la nature; Changement climatique; Transition écologique; Productivité de l'eau; Services écosystémiques; Irrigation de précision; Collecte des eaux.

Introduction : une lacune en matière de connaissance incompatible avec les impératifs du changement climatique

L'agroécologie est apparue comme un cadre scientifique pour remodeler les systèmes alimentaires sur la base de principes écologiques, englobant des dimensions agronomiques, écologiques, socio-économiques, politiques et culturelles (Wezel et al., 2020; FAO, 2018; HLPE, 2019; Murgia et al., 2026). Il porte sur le principe de produire des aliments durables

* Research Team Leader - Soils, Waters and Agronomy, International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), Rabat, Morocco. E-mail: v.nangia@cgiar.org

tout en travaillant en harmonie avec les principes naturels. Il adopte une approche holistique, multi-échelles et multi-acteurs pour remodeler les systèmes alimentaires afin de répondre aux défis environnementaux, économiques et sociaux qui existent dans les systèmes agricoles des zones arides et irriguées. Ainsi, les fonctions agroécologiques et les fonctions de soutien telles que les pratiques de production agricole (conservation des sols et de l'eau; gestion de l'irrigation; gestion des engrais, des mauvaises herbes et des insectes nuisibles; gestion des cultures; et d'autres pratiques de gestion agricole devraient travailler ensemble en harmonie pour réaliser un plus grand impact positif sur la sécurité alimentaire mondiale tout en protégeant et en soutenant les fonctions agroécologiques et les services environnementaux. Alors que l'agriculture irriguée représente environ 20% des terres cultivées dans le monde, elle fournit 40% de la production alimentaire mondiale (FAO, 1996 ; Grafton et al., 2018). À l'échelle mondiale, environ 70% des prélèvements d'eau douce sont destinés à l'agriculture irriguée. L'agroécologie et l'irrigation sont toutes deux promues en tant que mesures d'adaptation au changement climatique (GIEC, 2023 ; Pörtnner et al., 2022), et toutes deux visent à améliorer la durabilité des systèmes alimentaires afin de répondre à la demande alimentaire et en fibres de la population mondiale en croissance rapide. Ainsi, l'agriculture irriguée continuera à jouer un rôle crucial face à cette demande, et son importance par rapport aux sociétés et à toute l'humanité ne cesse de croître au fil du temps, compte tenu des implications négatives du changement climatique sur la productivité agricole (Irmak, 2023). Irmak et al. (2025) ont constaté que, face à la nécessité projetée d'augmenter la production alimentaire de 60% pour atteindre la sécurité alimentaire d'ici 2050, le défi consiste à atteindre cet objectif avec des ressources en eau identiques ou même réduites sans sacrifier d'autres services et fonctions écologiques de l'eau. Ils ont en outre ajouté que le défi est d'autant plus complexe lorsque l'on prend en compte d'autres facteurs de pression pesant sur cette ressource, tels que le changement climatique, la pollution, la mauvaise gestion et les politiques, ainsi que les modifications du paysage.

Pourtant, dans la pratique, ces deux domaines de connaissance et de pratique restent remarquablement déconnectés. Dans la première revue de littérature systématique à l'interface de l'irrigation et de l'agroécologie, Leauthaud et al. (2025) ont identifié 38 articles scientifiques dans la base de données « Clarivate Web of Science » jusqu'en avril 2023. Parmi ceux-ci, moins de dix ont adopté une approche analytique et critique de la relation, et l'irrigation n'a été le plus souvent mentionnée que de manière superficielle — comme un élément agricole plutôt que comme un atout agroécologique potentiel (Leauthaud et al., 2025) et une méthode essentielle pour une production alimentaire durable. Il est apparu que les termes « irrigation » et « agroécologie » étaient statistiquement sans rapport au sein des articles eux-mêmes: ils figuraient dans des sections distinctes et avec de faibles interactions, ce qui indique que, même lorsqu'ils apparaissent dans la même étude, ils sont rarement intégrés (Leauthaud et al., 2025). Cela pourrait s'expliquer par le fait que la communauté scientifique n'a pas explicitement fait reconnaître une étude conjointe de ces deux domaines conceptuels et pratiques, ni pour une évaluation de leur impact collectif sur les ressources naturelles, les pratiques agricoles et la productivité agricole; une situation qui peut être considérée, jusqu'à présent, comme une occasion manquée.

Ce fossé disciplinaire trouve ses racines dans des structures profondes. L'irrigation et l'agroécologie diffèrent par leurs récits (agriculture conventionnelle contre agriculture alternative), leurs objectifs (efficacité et productivité par rapport à la santé et aux moyens de subsistance), leurs approches (technologique ou holistique), leurs échelles d'analyse et de mise en œuvre (parcelle et système d'irrigation par rapport à l'exploitation agricole et aux systèmes alimentaires locaux, régionaux ou mondiaux), ainsi que par leurs parties prenantes (associations, ministères gouvernementaux et laboratoires de recherche distincts) (Leauthaud et al., 2025 ; Fischer et al., 2025). Ces différences ont conduit à des occasions

manquées de concevoir des systèmes d'irrigation capables de renforcer les fonctions et services écosystémiques (Leauthaud & Leenhardt, 2025).

Face à l'accélération du changement climatique, cette coupure n'est plus défendable. Le GIEC (2023) a mis l'accent sur le fait que le changement climatique affecte déjà la disponibilité de l'eau, la productivité agricole et la sécurité alimentaire de diverses régions, les impacts les plus sévères se concentrant dans les zones arides et semi-arides où l'irrigation fait souvent la différence entre les mauvaises récoltes et les récoltes viables. Zhao et al. (2026) ont démontré que le changement climatique et l'expansion de l'irrigation remodelent déjà la pression hydraulique et les interactions amont-aval dans le bassin versant du Lancang-Mékong, avec des gains locaux d'économie d'eau de plus en plus compensées par l'expansion de l'irrigation à l'échelle du bassin — une découverte ayant des implications mondiales pour les agroécosystèmes irrigués sous stress climatique. Il n'existe plus la question de savoir si l'irrigation et le drainage doivent faire partie de la transition agroécologique, mais de savoir la manière dont ils peuvent être remodelés et repositionnés pour y contribuer.

État actuel des connaissances : l'irrigation, «acolyte invisible» de l'agroécologie

Une base de preuves fragmentée

La revue systématique faite par Leauthaud et al. (2025) a révélé que la littérature scientifique au croisement de l'irrigation et de l'agroécologie est non seulement rare mais fragmentée. La plupart des 38 articles identifiés se sont limités à des analyses du bilan hydrique de systèmes de culture ou à des manipulations expérimentales essayant des pratiques agroécologiques individuelles dans des conditions irriguées, à l'échelle de la parcelle. Seulement un petit nombre d'études a reconnu la coexistence de l'irrigation et de l'agroécologie en tant que des composantes compatibles d'un système, et moins encore ont soutenu que l'irrigation offrait une opportunité aux systèmes agroécologiques (Mdee et al., 2019 ; Leauthaud et al., 2022a, 2022b ; Romero et al., 2022 ; Altieri, 1992).

Inversement, plusieurs articles ont opposé explicitement l'irrigation et l'agroécologie, associant l'irrigation à une utilisation intensive d'intrants et à l'industrialisation de l'agriculture (Perez Neira, 2016; Gross et Jaubert, 2019 ; Basche et Edelson, 2017). Cette opposition reflète un récit plus large présentant l'irrigation comme un outil de la Révolution verte et des systèmes agro-industriels, apparemment éloigné des principes agroécologiques (Leauthaud et al., 2025).

Nouvelles preuves à l'échelle de la parcelle

Malgré la pénurie générale, un certain nombre d'études récentes ont commencé à démontrer que l'irrigation et les pratiques agroécologiques peuvent se renforcer mutuellement lorsqu'elles sont conçues conjointement :

Irrigation déficitaire et viticulture agroécologique. Romero et al. (2022) ont fourni l'examen le plus complet à ce jour sur la combinaison des stratégies d'irrigation déficitaire et des pratiques agroécologiques dans les vignobles méditerranéens, affirmant que l'irrigation et l'agroécologie devraient être associées pour améliorer conjointement l'efficacité de l'utilisation de l'eau, la productivité et la durabilité. Xue et al. (2025) ont démontré que le report de l'irrigation réduisait la consommation totale d'eau de 54,8% tout en améliorant les avantages économiques et en réduisant les maladies des cultures, ce qui suggère qu'un stress hydrique stratégique peut servir à la fois des objectifs de productivité et des fonctions écologiques.

Agriculture de conservation en conditions irriguées. Kienzler et al. (2012) ont montré que les pratiques d'agriculture de conservation sous irrigation ont modifié les modèles

FACE AU DEFI CLIMATIQUE, COMMENT L'IRRIGATION ET LE DRAINAGE PEUVENT CONTRIBUER A LA TRANSITION AGROECOLOGIQUE?

L'agroécologie se définit comme la conception et la mise en œuvre d'une agriculture durable fondée sur des principes et des services écologiques. Elle adopte une approche holistique, multi-échelle et multi-acteurs visant à remodeler les systèmes alimentaires en réponse aux défis environnementaux (y compris climatiques), économiques et sociaux.

Traditionnellement, l'irrigation et le drainage — qu'ils soient de surface ou souterrains — sont utilisés pour gérer la disponibilité, l'allocation et la gestion de l'eau en apportant de l'eau en l'absence de précipitations et en retirant l'eau excédantaire en cas de précipitations excessives, afin d'améliorer la productivité agricole. Ces outils sont souvent associés à des systèmes agro-industriels intensifs en intrants et nuisibles à l'environnement, semblant ainsi éloignés des principes agroécologiques. Ces outils sont souvent associés à des systèmes agro-industriels à forte intensité d'intrants et à l'utilisation de produits nocifs pour l'environnement, apparemment éloignés des principes agroécologiques.

Cependant, face au changement climatique, l'irrigation et le drainage, ainsi que la collecte de l'eau, doivent être reconsidérés non seulement comme des outils d'intensification, mais aussi comme des éléments clés de systèmes résistants au climat, respectueux de l'environnement et ancrés dans leur territoire. À ce titre, ils peuvent être intégrés dans des solutions fondées sur la nature visant à stabiliser ou à accroître les rendements, à améliorer la santé des sols, à réduire les impacts environnementaux négatifs et à favoriser une production diversifiée.

Des recherches émergentes — bien qu'encore limitées — proposent que ces pratiques de gestion de l'eau peuvent contribuer activement aux transitions agroécologiques, en particulier lorsqu'elles sont combinées à des connaissances autochtones et à des pratiques traditionnelles adaptées aux contextes locaux. Les instruments politiques et économiques joueront également un rôle crucial pour encourager cette évolution, en alignant les incitations sur les objectifs de durabilité à long terme.

Malgré leur potentiel, les liens entre l'agroécologie et l'irrigation et le drainage restent peu explorés : en avril 2023, seuls 38 articles scientifiques ont établi un lien explicite entre ces outils de gestion. Souvent, l'irrigation est mentionnée de manière superficielle, sans analyse approfondie de son rôle transformateur et sans lien avec les considérations relatives aux services agroécologiques.

Ce congrès vise à combler cette lacune. Il invite les chercheurs, les praticiens et les décideurs politiques à explorer la manière dont l'irrigation, le drainage de surface et souterrain, la collecte des eaux de pluie et les solutions d'eau fondées sur la nature — lorsqu'ils s'appuient sur des principes agroécologiques — peuvent contribuer à construire des systèmes alimentaires durables, inclusifs et résistants pour l'avenir.

d'utilisation de l'eau en Asie centrale, tandis que Mohammad et al. (2018) ont montré que le riz semencé directement dans l'agriculture de conservation dans les plaines indogangétiques a réduit la consommation d'eau par rapport au riz repiqué. Grâce à un réseau de programmes de recherche, de démonstration et d'éducation bien planifié, coordonné et exécuté (Réseau de gestion de l'eau agricole, AWMN), Irmak (2023) a montré qu'une mise

en œuvre technologique à grande échelle en partenariat avec près de 1 000 producteurs (représentant 1,20 million d'hectares de terres cultivées irriguées), peut entraîner une réduction des prélèvements d'eau de 144 mm/ha par saison de croissance en raison de l'adoption de technologies et de stratégies de gestion démontrées et enseignées dans l'AWMN. Entre la période 2005 et 2020, on estime que l'AWMN a réduit les prélèvements d'eau d'irrigation de plus de 5 milliards de m³ (5 km³; 4,1 millions d'acre-pied), et cette eau conservée a été mise à disposition pour d'autres usages agroécologiques. Le AWMN est devenu le programme de gestion de l'eau basé sur la recherche le plus important et le plus percutant aux États-Unis, réalisant une adoption considérable de la technologie et du transfert d'informations/de connaissances dans l'agriculture grâce à un partenariat solide et dévoué entre les universités, l'industrie privée, les agences étatiques et fédérales, les producteurs, les périmètres irrigués et les consultants en culture. Cela indique qu'en travaillant en partenariat avec tous les professionnels et praticiens impliqués dans l'agriculture, la gestion de l'eau et l'agroécologie, des réductions significatives peuvent être réalisées dans l'agriculture irriguée qui peuvent être mises à disposition pour protéger/maintenir les services agroécologiques et environnementaux. Kukal et Irmak (2021) ont examiné les effets exercés par l'agriculture de conservation (CA) sur la capacité de rétention d'eau du sol et les économies d'eau dans diverses conditions agroécologiques, en constatant que les effets de l'agriculture de conservation (CA) sur les économies d'eau variaient en fonction des pratiques de gestion et du contexte agroécologique — une nuance critique pour l'interface irrigation–agroécologie. Alletto et al. (2022) ont montré que les propriétés physiques du sol sont fortement influencées par les systèmes de culture, que la densité apparente du sol est généralement plus élevée en agriculture de conservation, que la conductivité hydraulique du sol est généralement plus élevée et plus stable au fil du temps en agriculture de conservation, et que la rétention d'eau dans le sol est équivalente ou légèrement supérieure dans l'agriculture de conservation que dans les sols labourés de manière conventionnelle. Plus récemment, Devkota et al. (2025) ont montré que des solutions agronomiques spécifiques au contexte intégrant l'agriculture de conservation avec une irrigation optimisée obtenaient des gains agronomiques avec une empreinte environnementale réduite dans les zones arides irriguées en Égypte.

Irrigation de précision et à débit variable. Sharma et Irmak (2020) ont réalisé des comparaisons économiques entre l'irrigation à débit variable et la fertigation avec une irrigation à débit fixe (uniforme), démontrant qu'une gestion spécifique de l'eau et des nutriments peut améliorer à la fois la productivité de l'eau et les rendements économiques tout en réduisant l'intensité des intrants — un résultat conforme aux principes agroécologiques de réduction des intrants et d'efficacité des ressources. Sharma et Irmak (2021a) ont par ailleurs démontré que l'efficacité de l'irrigation à débit variable dépend fortement de la variabilité spatiale du type de sol, de la topographie et de la dynamique eau-sol. Sur une période de trois ans et pour trois types de sols, ils ont observé que l'évapotranspiration des cultures et la réserve en eau du sol réagissent différemment à la gestion de l'irrigation et de l'azote selon la position du paysage; cela prouve que les stratégies d'irrigation uniforme ne tiennent pas toujours compte de manière adéquate des besoins en eau des cultures, lesquels sont spatialement hétérogènes. Sharda et al. (2022) ont avancé la résolution spatiale de la gestion de l'irrigation en évaluant le stress hydrique des cultures au niveau d'une partie de parcelle dans le cadre de l'irrigation à débit variable, fournissant ainsi la base technique pour une planification de l'irrigation qui tienne compte de l'hétérogénéité de la parcelle — une condition préalable à la gestion de systèmes de culture diversifiés, orientés vers l'agroécologie, où la demande en eau varie dans l'espace et dans le temps. Irmak et al. (2025) ainsi qu'Irmak et Hinn (2025) ont montré la manière dont l'irrigation à débit variable dans différents types de sol peut être gérée efficacement pour augmenter la productivité des cultures et l'efficacité d'utilisation des intrants. Irmak et al. (2023) ainsi qu'Irmak et Mohammed (2023) ont étudié la manière dont différentes méthodes/systèmes d'irrigation (irrigation goutte-à-goutte souterraine, irrigation

par pivot central et irrigation gravitaire par sillons) peut être gérée efficacement pour l'irrigation et la gestion de l'azote. L'étude vise à améliorer la rentabilité de la production de maïs, à augmenter l'efficacité de l'utilisation de l'azote et la productivité de l'eau des cultures afin de conserver ces ressources critiques et d'aider à protéger les services agroécologiques en réduisant ou minimisant la contamination chimique des ressources en eaux souterraines et de surface, tout en mettant davantage d'eau à la disposition des systèmes agroécologiques grâce à des pratiques avancées de conservation et de gestion.

Irrigation goutte à goutte et fertigation biologique. Plusieurs études ont identifié l'irrigation goutte-à-goutte comme une pratique compatible avec les objectifs agroécologiques, en particulier lorsqu'elle est associée à des stratégies de fertigation biologique (Guzman et Alonso, 2008 ; Leauthaud et al., 2022b; Akakpo et al., 2021). D'autres projets de recherche ont mis en évidence des stratégies efficaces de gestion de l'irrigation et de la fertigation pour l'irrigation goutte-à-goutte souterraine, en tenant compte de la diversité des sols, des cultures, des méthodes d'irrigation et des pratiques de gestion (travail du sol, densité des plantes, etc.) dans différents climats afin d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et des nutriments par les cultures et d'améliorer le rendement dans des conditions d'irrigation complète, déficitaire et limitée (Payero et al., 2008; Irmak et al., 2015; Irmak et Djaman, 2016; Yonts et al., 2018; Mohammed et Irmak, 2022; Irmak et al., 2023; Irmak, 2024). L'irrigation goutte-à-goutte permet d'utiliser des engrais organiques concentrés nécessitant moins d'énergie et peut être combinée avec des cultures de couverture et du paillis pour réduire l'évaporation (Wezel et al., 2014). Cependant, la classification de l'irrigation goutte-à-goutte en tant que pratique agroécologique a été remise en question en raison de la consommation de plastique et des effets de rebond à des échelles spatiales plus grandes (Leauthaud et al., 2025 ; Grafton et al., 2018). Irmak et al. (2024) et Irmak et al. (2025) ont souligné qu'outre les intrants traditionnels (eau, nutriments, produits chimiques) appliqués au sol et absorbés par les cultures, l'utilisation/l'application d'autres intrants en agriculture — tels que les plastiques synthétiques — connaît une augmentation d'application pour diverses applications agricoles, entraînant une contamination environnementale et d'autres défis. Le paillage en plastique synthétique est particulièrement retenu pour la lutte contre les mauvaises herbes dans certaines cultures où peu d'herbicides sont disponibles. Les paillis fabriqués à partir de polymères synthétiques tels que le polyéthylène sont couramment utilisés en agriculture. Cependant, ces polymères à base de pétrole sont stables/non dégradables et leur utilisation généralisée dans les parcelles agricoles peut créer de graves problèmes environnementaux.

Cultures de couverture et interactions d'irrigation. Rouge et al. (2022) ont démontré que l'irrigation peut favoriser l'établissement de cultures de couverture et soutenir leur développement pour fournir les services écosystémiques attendus, soulignant les effets d'interaction entre la gestion de l'eau et les pratiques agroécologiques. Basche et Edelson (2017) ont décrit comment les pratiques favorisant une couverture végétale continue améliorent la gestion de l'eau en modifiant le bilan hydrique et en augmentant les fonctions hydrologiques du sol. Irmak et al. (2018) ont déclaré que, en plus de fournir de l'azote et d'autres nutriments et micronutriments bénéfiques à une culture commerciale ultérieure, les cultures de couverture peuvent également enrichir le sol en matière organique, ce qui peut améliorer la matière organique du sol, les propriétés physiques du sol et les caractéristiques d'infiltration. Les cultures de couverture possèdent également le potentiel d'améliorer la capacité du sol à transporter des machines et d'améliorer l'accessibilité aux parcelles (principalement dans les zones humides à forte précipitation), ainsi que d'éliminer l'eau excédentaire et de maintenir les composants structurels du sol.

Irrigation et diversification des cultures. Altieri (1992) a vu l'irrigation comme une opportunité pour la diversification des cultures et un moyen d'améliorer la résistance du système, tandis que Leauthaud et al. (2022a) ont décrit l'irrigation comme un facteur important

dans le développement de l'agroforesterie dans les oliveraies en Tunisie. En Tanzanie, Mdee et al. (2019) ont montré que les exploitations agricoles offraient de meilleurs moyens de subsistance lorsque des systèmes de production agroécologiques étaient mis en œuvre avec un accès conjoint à l'irrigation.

Preuves à l'échelle de la ferme, du territoire et des systèmes alimentaires

Les recherches menées à des échelles dépassant celle de la parcelle restent particulièrement rares. Moraine et al. (2016) ont montré que l'introduction de systèmes de culture moins exigeants en eau dans des zones en stress hydrique pouvait influencer sur les ressources en eau à l'échelle du territoire; des cultures nécessitant moins d'irrigation, comme la luzerne, permettaient en effet d'équilibrer la consommation d'eau d'irrigation à l'échelle du bassin versant tout en favorisant des systèmes intégrés associant cultures et élevage. Galeana-Pizana et al. (2021) ont mis en évidence les liens entre l'irrigation et les caractéristiques du système alimentaire, indiquant que l'irrigation à petite échelle pourrait considérablement augmenter les rendements des petits exploitants dans les écorégions plus sèches où les produits agroécologiques sont vendus dans les marchés locaux.

Selon la perspective de sciences sociales, Gross et Jaubert (2019) ont étudié des cas d'échec dans la mise en œuvre concernant aussi bien des projets de développement de l'irrigation que des projets de développement agroécologique au Burkina Faso. Ils ont relevé de nombreuses similitudes entre ces deux types de projets et ont formulé des critiques constructives sur la manière dont ils sont promus, sans prendre suffisamment en compte la diversité des situations et des stratégies des petits agriculteurs. Les conséquences hydrologiques de l'irrigation à l'échelle du bassin ont été documentées par Zhang et al. (2014), qui ont montré que l'irrigation économe en eau dans l'oasis du bassin versant de Tarim avait exercé des impacts complexes sur la dynamique des eaux souterraines et sur la gestion durable de l'eau, ainsi que par Zhao et al. (2026), qui ont démontré que le changement climatique et l'expansion de l'irrigation a remodelé la pression hydrique dans le bassin du Lancang-Mékong — preuve que la transition agroécologique des systèmes irrigués doit être évaluée dans son contexte hydrologique et sociohydrologique plus large (Liu et al., 2014, 2015; Han et al., 2017).

Changement climatique comme catalyseur de réconciliation

Le changement climatique intensifie l'urgence de combler les lacunes entre l'irrigation et l'agroécologie. Le sixième rapport d'évaluation du GIEC (2023) documente l'augmentation de la fréquence et de la gravité des sécheresses, la modification des régimes de précipitations et la hausse des températures qui affectent de manière disproportionnée les systèmes agricoles des régions confrontées à la pénurie d'eau. Pörtner et al. (2022) ont souligné que les impacts du changement climatique sur les systèmes alimentaires sont médiatisés par l'eau, faisant de la gestion de l'eau un levier central pour l'adaptation au climat.

Dans ce contexte, l'irrigation et le drainage doivent être envisagés non seulement comme des outils d'intensification, mais aussi comme des composantes clés de systèmes résistants au climat et fondés sur des principes écologiques. Ils peuvent contribuer à des solutions fondées sur la nature ou à des solutions hybrides «gris-vert» lorsque leur conception préserve ou restaure les fonctions écosystémiques et offre des avantages mesurables pour la biodiversité et le bien-être humain (Tarolli et al., 2026). Il a été démontré que l'irrigation d'appoint — l'application de faibles quantités d'eau à des stades critiques du développement des cultures dans des systèmes principalement pluviaux — permet de plus que doubler le rendement en grains par goutte d'eau dans les systèmes agricoles situés dans les zones arides dans les pays tels que la Chine, l'Inde, l'Irak, le Maroc et l'Ouzbékistan (Nangia et al., 2018 ; Devkota et al., 2023). Cela prouve qu'une utilisation stratégique de l'irrigation peut stabiliser la production pluviale face à une variabilité climatique croissante, sans incliner à des systèmes entièrement irrigués et intensifs à haut niveau d'intrants. La collecte des eaux de pluie offre une option

fondée sur les écosystèmes à l'interface entre agriculture pluviale et irriguée. Tarolli et al. (2026) ont coécrit une synthèse approfondie sur les solutions fondées sur la nature pour la conservation des sols et de l'eau en période d'extrêmes climatiques, mettant en évidence le rôle joué par la gestion des eaux de pluie dans les systèmes pluviaux. Dans une analyse mondiale du potentiel de collecte des eaux de pluie, Piemontese et al. (2020) ont évalué la transmissibilité de ces pratiques à partir d'études de cas réussies; ils ont démontré que ces approches permettent de combler les lacunes entre la vulnérabilité de l'agriculture pluviale et la stabilité de l'agriculture irriguée, sans engendrer les coûts environnementaux associés aux infrastructures d'irrigation conventionnelles à grande échelle. Villani et Castelli (2025) a utilisé une approche de modélisation participative pour explorer les stratégies de stockage combinant grands barrages et petits réservoirs dans le contexte du changement climatique, afin d'étudier leur complémentarité en fournissant les outils de planification spatiale nécessaires pour intégrer la collecte des eaux de pluie dans la conception de paysages agroécologiques.

Inversement, les pratiques agroécologiques peuvent réduire la demande en eau d'irrigation grâce à divers mécanismes, notamment une meilleure rétention d'eau par le sol, une augmentation de la matière organique, la diversification des systèmes de culture nécessitant moins d'eau et une amélioration de la structure du sol (Mdee et al., 2019 ; Basche et Edelson, 2017 ; Çakmakçı, 2025). Cette relation bidirectionnelle — l'irrigation soutenant les pratiques agroécologiques et les pratiques agroécologiques réduisant la dépendance à l'irrigation — représente un cycle vertueux qui a été insuffisamment étudié ou exploité.

Vers l'irrigation multiservice : un cadre conceptuel de réconciliation

Leauthaud et Leenhardt (2025) ont proposé l'irrigation multiservice comme paradigme visant à concilier la gestion de l'eau et les objectifs agroécologiques. Dans ce cadre, l'irrigation n'est pas seulement planifiée et mise en œuvre pour soutenir les rendements et la production de biomasse, mais aussi pour renforcer les fonctions écosystémiques essentielles à une production alimentaire durable. L'irrigation multiservice repose sur l'interaction entre les aspects de fonctionnement du système d'irrigation — notamment sa configuration, son contrôle et les volumes d'eau apportés — et les pratiques agroécologiques, afin d'améliorer les fonctions écologiques des sols et des plantes et de générer un ensemble de services écosystémiques (Leauthaud et Leenhardt, 2025). Ce concept constitue une base précieuse pour la démarche présentée ici. La socio-hydrologie l'enrichit en considérant l'irrigation et le drainage comme des interventions au sein de systèmes couplés « humains-eau », où les politiques, les technologies, les réactions des agriculteurs, les modes d'allocation et les évolutions des écosystèmes co-évoluent (Liu et al., 2014, 2015 ; Han et al., 2017 ; Tian et al., 2026).

Le cadre de l'irrigation multiservice identifie sept principes partagés par l'agroécologie et la science de l'irrigation : le recyclage/la circularité, la réduction des intrants/l'efficacité, la gouvernance des terres et des ressources naturelles, la participation, l'innovation et le partage des connaissances. (Leauthaud & Leenhardt, 2025; Wezel et al., 2020; CIID, 2017; Tardieu, 2005; Ostrom, 1993). En intégrant d'autres principes agroécologiques — la santé des sols, la biodiversité, la synergie, la diversification économique, les valeurs sociales et les régimes alimentaires, l'équité et la connectivité — dans la planification des systèmes d'irrigation, ce cadre envisage l'irrigation comme un moyen de fournir une pluralité de services écosystémiques.

Ce cadre conceptuel a des parallèles dans la littérature plus large sur l'agriculture multifonctionnelle et l'intensification écologique. Rasmussen et al. (2024) ont démontré dans la Reue « Science » que la diversification de l'agriculture offre des avantages environnementaux et sociaux conjoints, tandis que Nika et al. (2020) ont plaidé pour l'intégration des principes de l'économie circulaire dans les systèmes d'eau. Okiria et al. (2021), dans une revue publiée

dans « Sustainability », ont examiné le potentiel de paiement pour les services écosystémiques (PES) provenant de l'exploitation des structures de contrôle de l'eau agricoles, faisant valoir que les infrastructures d'irrigation et de drainage peuvent être gérées pour fournir des ensembles de services écosystémiques au-delà de la production agricole — y compris la régulation des inondations, la préservation de la biodiversité et les services culturels — si des instruments économiques appropriés sont déployés.

En outre, ces fonctions multiservices ne constituent pas des avantages passifs de l'infrastructure physique mais nécessitent une gestion active et à forte intensité de main-d'œuvre par les institutions locales. Dans le cadre du projet d'irrigation de Kotsu dans la préfecture d'Aichi, au Japon, Otsuka et al. (2025) ont utilisé le nombre de fonctionnement de vannes comme indicateur quantitatif de l'effort de gestion. Ils ont constaté que, bien que les opérations liées à l'irrigation soient restées stables malgré la perte de terres agricoles en forme de mosaïque, le nombre total de fonctionnement de vannes est passé de 3358 à 4974 entre les périodes passées et présentes en raison de l'intensification des opérations de protection contre les crues. Cela démontre que la gestion de l'eau à usages multiples est un service écosystémique actif et soutenu par l'homme.

Drainage en tant qu'outil agroécologique

Bien que l'interface irrigation-agroécologie ait commencé à attirer l'attention, le rôle joué par le drainage dans les transitions agroécologiques reste encore moins exploré. Il a été démontré que le drainage contrôlé — qui comprend la gestion de la profondeur et le calendrier d'évacuation des eaux de drainage souterrain — réduit de 30 à 50% les pertes de nitrates vers les milieux récepteurs, tout en maintenant ou en améliorant les rendements des cultures (examiné dans Skaggs et al., 2012, ainsi que, plus récemment, les évaluations des services écosystémiques réalisées par Mitchell et al., 2023). Les bioréacteurs de dénitrification et les zones tampons saturées, installés au bord de parcelles équipées de tuyaux souterrains, peuvent éliminer des nitrates de l'ordre de 25 et 98% présents dans les eaux de drainage avant qu'il n'atteigne les eaux de surface (Christianson et al., 2017); il s'agit là d'une solution fondée sur la nature qui concilie les infrastructures de drainage avec les objectifs de qualité de l'eau et de préservation des services écosystémiques.

Le drainage contrôlé offre également des perspectives en matière d'atténuation du changement climatique. En maintenant des niveaux des nappes phréatiques plus élevés durant les périodes de jachère, cette technique peut ralentir la décomposition de la matière organique et préserver le carbone du sol dans les sols organiques drainés (D'Acunha et al., 2026). La réutilisation des eaux de drainage pour but d'irrigation d'appoint — une pratique documentée dans les régions arides et semi-arides — représente une forme de circularité de l'eau agricole qui s'aligne à la fois sur l'efficacité de l'irrigation et sur les principes agroécologiques (Nika et al., 2020). Ces innovations en matière de drainage ont rarement été évaluées dans un cadre agroécologique explicite. Une démarche crédible doit également prendre en compte l'engorgement des sols, la salinité, les besoins de lessivage, l'évacuation des sels, la consommation d'énergie et la qualité de l'eau en aval (Zhang et al., 2014).

Paradoxe de l'efficacité de l'irrigation et ses implications agroécologiques

Toute réflexion sur l'irrigation dans le cadre des transitions agroécologiques doit prendre en compte le paradoxe de l'efficacité de l'irrigation mis en évidence par Grafton et al. (2018) dans la revue **Science**. L'amélioration de l'efficacité de l'irrigation à l'échelle de l'exploitation entraîne souvent une augmentation de la consommation d'eau à l'échelle du bassin, les agriculteurs étendant les surfaces irriguées ou se tournant vers des cultures à plus forte valeur ajoutée mais plus gourmandes en eau; il s'agit d'un effet rebond qui compromet les objectifs de conservation de la ressource en eau. Zhang et al. (2014) ont documenté ce phénomène dans le bassin versant de Tarim, où une irrigation économe en eau à l'échelle de

la parcelle a exercé des effets complexes sur les eaux souterraines et la salinité des oasis. Zhao et al. (2026) ont étendu cette analyse au bassin du Lancang–Mékong, montrant que le changement climatique et l'expansion de l'irrigation interagissent pour remodeler la pression hydrique d'une manière que les gains d'efficacité locaux seuls ne peuvent résoudre.

Ce cadrage de rebond, cependant, n'est pas sans défi. Une vision mécaniste plus directe soutient que l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation réduit le volume d'eau prélevé des sources de surface et souterraines par unité de culture produite, et que cette réduction du prélèvement est l'effet le plus fondamental et mesurable des gains d'efficacité. Selon cette vision, les augmentations de la consommation à l'échelle du bassin observées dans certaines études peuvent refléter des facteurs confondants tels que les incitations politiques, les changements de culture induits par le marché, ou l'expansion de la superficie irriguée pour des raisons indépendantes des améliorations d'efficacité plutôt qu'un rebond causal direct induit par l'efficacité elle-même. Pour concilier ces perspectives, il convient de distinguer le prélèvement d'eau (que les gains d'efficacité tendent à réduire) de la consommation ou de l'épuisement de la ressource à l'échelle du bassin (qui peut augmenter pour des raisons seulement partiellement liées à l'efficacité au niveau de l'exploitation), une distinction qui n'est pas toujours explicite dans la littérature consacrée à l'effet de rebond.

Ce paradoxe exerce des implications majeures sur la transition agroécologique : si l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation permet simplement une production plus intensive, elle risque d'aller à l'encontre des objectifs agroécologiques de réduction des intrants et de gestion responsable des ressources. Pour y remédier, il est nécessaire de mettre en place des limites à l'échelle du bassin sur la consommation et l'expansion des zones irriguées, de tenir en compte des débits récupérés et de coordonner la politique hydrique et foncière, plutôt que de se focaliser uniquement sur des objectifs d'efficacité (Liu et al., 2014, 2015 ; Leauthaud et Leenhardt, 2025).

Par ailleurs, cet indicateur unidimensionnel ne tient compte ni des cycles hydrologiques locaux impliquant le recyclage de l'eau, ni du vaste réseau d'externalités positives — telles que l'atténuation des inondations, la réalimentation des nappes phréatiques ou la conservation des écosystèmes — dont la valeur est estimée à 48,6 milliards de dollars par an dans le cas du Japon (Conseil scientifique du Japon, 2001). Pour réconcilier avec ce paradoxe, les cadres de surveillance mondiale doivent évoluer vers une évaluation globale de l'eau qui intègre formellement ces externalités positives.

Politiques et instruments économiques : Assurer la transition

Les cadres politiques actuels compartimentent souvent l'irrigation et l'agroécologie, en les traitant comme des questions distinctes gérées par différents départements gouvernementaux, soutenues par différents mécanismes de financement et évaluées selon différents indicateurs de performance. (Leauthaud et al., 2025; Leauthaud & Leenhardt, 2025). Cette compartimentation constitue un obstacle structurel à l'approche intégrée nécessaire.

La littérature récente sur les politiques publiques propose des voies pour l'avenir. Das et al. (2025) ont souligné le rôle joué par des politiques, des technologies et de l'innovation pour réaliser la résistance des ressources dans la gestion de l'eau. Le Compendium de politiques de la Banque mondiale (2025) sur la réorientation du soutien agricole a recommandé de réorienter les subventions des intrants vers des incitations conditionnelles qui réduisent l'utilisation de l'eau par unité de production et améliorent les résultats environnementaux (Banque mondiale, 2025). Okiria et al. (2021) ont soutenu que le paiement des services écosystémiques (PES) provenant des ouvrages de maîtrise de l'eau agricoles pourrait créer des incitations économiques pour la gestion des infrastructures d'irrigation et de drainage afin de fournir de multiples services écosystémiques, bien tout en notant que les projets de PES dans le domaine de l'eau agricole restent rares et géographiquement limités. Timpanaro et

al. (2026) ont examiné les cadres politiques soutenant l'agroécologie en Méditerranée. Les preuves sociohydrologiques montrent en outre que les valeurs sociétales et les structures de gouvernance co-évoluent et peuvent permettre ou contraindre les transitions vers la durabilité (Wei et al., 2023).

Une priorité de recherche essentielle comporte l'analyse et la conception des politiques publiques qui font simultanément progresser l'irrigation durable et les transitions agroécologiques. Cela inclut l'examen des instruments de politique existants afin de déterminer s'ils favorisent par inadvertance les modèles agricoles conventionnels à forte consommation d'intrants, et comment ils pourraient être réformés. Les politiques, qui lient l'accès à l'eau à l'adoption de pratiques agroécologiques, la planification spatiale des systèmes d'irrigation pour refléter à la fois la disponibilité des ressources et les besoins locaux, ainsi que les instruments multi-échelles conciliant intérêts privés et publics, représentent des orientations prometteuses. La communauté CIID, grâce à ses liens établis avec les ministères chargés de l'eau, les organismes d'irrigation, les partenaires du secteur privé et les réseaux professionnels dans plus de 90 pays, est idéalement placée pour faire avancer cette démarche politique.

Priorités de recherche pour l'irrigation, le drainage et la transition agroécologique

Sur la base des lacunes identifiées dans la revue de littérature et de l'expertise collective de l'équipe d'auteurs chargée de la «Question 66», nous proposons six priorités de recherche qui complètent les thèmes de pointe soulignés par Leauthaud et Leenhardt (2025). La Hongrie recherche des moyens innovants d'utiliser les systèmes d'irrigation et de drainage pour la rétention d'eau et/ou le réapprovisionnement en eau, en établissant un nouveau calendrier d'exploitation. Ce nouveau calendrier permet de stocker l'eau dans le sol; l'élévation du niveau de la nappe phréatique devrait, espère-t-on, réduire les besoins en eau d'irrigation. (Szamosvari, 2026) Bien que leurs thèmes aient abordé le concept d'irrigation multiservice d'un point de vue principalement conceptuel et méditerranéen, nos priorités émergent des aspects pratiques, technologiques, hydrologiques, et institutionnels des défis auxquels sont confrontés les professionnels de l'irrigation et du drainage dans divers contextes géographiques et de développement — des systèmes d'irrigation de précision du Midwest américain aux paysages de collecte des eaux en Afrique subsaharienne, en passant par l'agriculture oasisienne en Asie centrale et les systèmes rizicoles en Asie du Sud et du Sud-Est.

Priorité 1: Irrigation de précision et à débit variable comme catalyseurs de la diversification agroécologique

Les technologies d'irrigation à débit variable (VRI) et de fertigation spécifique au site, développées principalement pour les systèmes de monoculture conventionnels, n'ont pas fait l'objet d'une évaluation systématique quant à leur capacité à favoriser la diversification agroécologique à l'échelle du sous-champ. Par ailleurs, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour déterminer le seuil de variabilité au sein de la parcelle qui justifie la mise en œuvre de la technologie VRI afin d'améliorer la productivité de l'eau des cultures et d'économiser les ressources en eau ainsi que d'autres intrants. Sharma et Irmak (2020 ; 2021a, b) ont démontré la viabilité économique de la VRI et de la fertigation par rapport à une gestion à débit uniforme, tout en montrant que la VRI spécifique au sol et la fertigation à débit variable peuvent réduire les intrants d'irrigation et d'engrais tout en maintenant la productivité des cultures. Sharda et al. (2022) ont également démontré qu'il est possible de cartographier le stress hydrique des cultures à l'échelle du sous-champ, offrant ainsi une base pour une gestion de l'irrigation ciblée spatialement. Toutefois, ces technologies ont été déployées presque exclusivement dans des systèmes de culture intensifs en intrants. Une recherche critique exige d'adapter et d'évaluer les technologies d'irrigation de précision pour des systèmes de culture diversifiés et multi-espèces — y compris les cultures mixtes, l'agroforesterie et les cultures en relais — où la demande en eau varie non seulement dans

l'espace mais aussi dans le temps selon les espèces cultivées et le stade de croissance au sein d'une même parcelle. Cela nécessiterait de nouvelles configurations de capteurs, des algorithmes d'aide à la décision et des protocoles de planification d'irrigation qui tiennent compte de la complexité des polycultures plutôt que de l'uniformité des monocultures. Irmak (2015) et Irmak (2024) ont fait progresser la compréhension de la réponse du maïs à différentes stratégies de gestion de l'irrigation (goutte-à-goutte souterraine et par aspersion), fournissant ainsi les données spécifiques à la culture concernant l'évapotranspiration (ET) et la réponse au rendement, nécessaires pour chaque espèce composant les systèmes diversifiés.

Priorité 2: Conséquences hydrologiques des transitions agroécologiques dans les paysages irrigués à l'échelle du bassin

Le paradoxe de l'efficacité de l'irrigation (Grafton et al., 2018) démontre que les économies d'eau réalisées à l'échelle de la parcelle ne se traduisent pas nécessairement, dans certains cas, par une conservation de la ressource en eau à l'échelle du bassin. Zhang et al. (2014) ont montré que l'irrigation économe en eau dans l'oasis de Tarim avait exercé des effets complexes sur la dynamique des eaux souterraines, tandis que Zhao et al. (2026) ont documenté la manière dont le changement climatique et l'expansion de l'irrigation remodelent les pressions exercées sur la ressource en eau à l'échelle du bassin. Toutefois, il n'existe aucune étude de comparaison concernant les conséquences hydrologiques des transitions agroécologiques sur les paysages irrigués. Si un bassin versant irrigué de manière conventionnelle adopte une gestion agroécologique — intégrant des cultures de couverture, des rotations diversifiées, des techniques de conservation (réduite) ou de l'absence de travail du sol, et des modifications de la matière organique — il s'agit de savoir quels sont les effets cumulés sur l'évapotranspiration, la réalimentation des nappes phréatiques, les débits récupérés et la disponibilité de l'eau en aval. Cela nécessite des modèles sociohydrologiques et agronomiques couplés qui représentent l'hydrologie, les décisions relatives aux cultures, la politique, l'adoption de technologies, l'expansion des terres et les retours d'expérience à différentes échelles (Liu et al., 2014, 2015 ; Han et al., 2017). L'évaluation doit rendre compte de la consommation, des débits récupérés, des eaux souterraines, de la salinité, de l'équité et des effets en aval par rapport à des scénarios contrefactuels explicites.

Priorité 3: Collecte des eaux de pluie et stockage à petite échelle en tant que solutions fondées sur la nature pour la transition d'une agriculture pluviale vers une agriculture irriguée

Dans de nombreuses régions arides, la transition agroécologique implique de passer de systèmes entièrement pluviaux à des systèmes partiellement irrigués grâce à une irrigation d'appoint alimentée par la collecte de l'eau plutôt que par les infrastructures d'irrigation conventionnelles. Villani et al. (2025) et Tarolli et al. (2025) ont fait progresser la compréhension des solutions fondées sur la nature pour la conservation des sols et de l'eau (restauration des zones humides et de la zone tampon riveraine — citées par Tarolli et al. (2025) pour la régulation de l'eau — dans le contexte des événements climatiques extrêmes), tandis que Piemontese et al. (2020) ont estimé le potentiel mondial de la collecte des eaux en s'appuyant sur des études de cas réussies. Des exemples typiques de pratiques de collecte des eaux de pluie sont les étangs creusés, utilisés pour la collecte et le stockage de l'eau de précipitation au sein des terres agricoles en vue d'une irrigation d'appoint durant les périodes sèches (Liniger et Mekdaschi Studer, 2019). D'autres pratiques répandues sont les terrasses, construites sur des terrains en pente pour ralentir le ruissellement et augmenter l'infiltration et traditionnellement utilisées dans les zones montagneuses latino-américaines, africaines et asiatiques (Denevan, 2003, Mekdaschi Studer et Liniger, 2018, Saiz et al., 2016, Stroosnijder, 2009). En utilisant une approche de modélisation participative, Castelli et Villani et al. (2025) ont démontré la manière dont les grands barrages et les petits réservoirs peuvent être modélisés conjointement comme des stratégies de stockage complémentaires dans

un contexte de changement climatique. Cependant, le rôle joué par la collecte de l'eau en favorisant des transitions agroécologiques — en particulier la conception de systèmes de stockage à petite échelle qui soutiennent la diversification des cultures, l'intégration de l'élevage et la fourniture de services écosystémiques à l'échelle du paysage — reste insuffisamment exploré. Il est nécessaire de mener des recherches sur: (i) la quantification du potentiel de la collecte des eaux pour l'irrigation d'appoint de systèmes de cultures diversifiés dans les zones agroécologiques; (ii) l'évaluation des co-bénéfices des services écosystémiques des petits réservoirs et des ouvrages de collecte des eaux (biodiversité, séquestration du carbone, rétention des sédiments); et (iii) le développement des outils de planification participative intégrant la collecte des eaux dans la conception de paysages agroécologiques.

Priorité 4: Instruments économiques et innovation institutionnelle pour l'intégration de l'irrigation et de l'agroécologie

Les dimensions institutionnelles et économiques de l'intégration de l'irrigation et de l'agroécologie ont suscité beaucoup moins d'intérêt que les dimensions biophysiques. Okiria et al. (2021) ont examiné le potentiel des paiements pour services écosystémiques (PES) liés aux ouvrages de maîtrise de l'eau agricole; ils ont constaté que, bien que le concept soit prometteur, les dispositifs de PES dans ce domaine restent rares et géographiquement concentrés. Les recherches de Kawasaki sur la gestion des infrastructures hydrauliques agricoles au Japon (Kawasaki et al., 2024) et sur les bouquets de services écosystémiques fournis par les réseaux de canaux d'irrigation offrent un cadre pour réfléchir sur la valorisation, le financement et la gouvernance des infrastructures d'irrigation et de drainage. Il est nécessaire de mener des recherches sur: (i) le développement et l'essai des instruments économiques qui récompensent les opérateurs d'irrigation et de drainage pour la fourniture de services écosystémiques en plus de la distribution d'eau; (ii) la conception des dispositions de gouvernance de l'eau permettant de combler l'écart institutionnel entre les agences d'irrigation et les organismes de promotion de l'agroécologie; et (iii) l'évaluation du rôle joué par les plateformes de parties prenantes multiples dans la promotion de la gestion conjointe des systèmes d'irrigation et agroécologiques, en s'appuyant sur les approches participatives documentées par Pahl-Wostl et al. (2008) et Ameur et Leauthaud (2024).

Priorité 5: Dynamique eau-sol et productivité de l'eau dans le cadre des interactions entre l'agriculture de conservation et l'irrigation

L'interaction entre les pratiques d'agriculture de conservation (AC) — sans travail du sol, cultures de couverture, maintien des résidus — et la gestion de l'irrigation est complexe sur le plan biophysique et dépend du contexte. Il est tout aussi crucial de reconnaître et de comprendre les effets de toute pratique de gestion des cultures et/ou des sols sur la consommation d'eau des cultures que d'en appréhender les impacts prévus. Le travail de conservation du sol est l'une de ces pratiques adoptées par les producteurs dans les régions américaines de culture du maïs; elle vise à maintenir environ 30 à 40% ou plus, de la couverture végétale résiduelle sur la surface du sol après le semis. La présence de nombreux facteurs en interaction suggère que la réussite de cette pratique dépend des conditions locales, ce qui nécessite des données scientifiques/fondées sur la recherche (Irmak et al., 2019). Grâce à des recherches approfondies menées sur le terrain, Irmak et al. (2019) ont quantifié l'évapotranspiration des cultures (ETc), le microclimat, le rendement, la productivité de l'eau (WP) et d'autres variables pour le maïs irrigué (*Zea mays* L.) dans le cadre de deux systèmes: le travail du sol en disques (DT) (conventionnel) et sans travail du sol (NT) (conservation) en 2011, 2012 et 2013 sur deux champs de producteurs soigneusement gérés et surveillés, qui sont soumis à ces pratiques de gestion du travail du sol depuis plus de 17 ans. While the research was not designed agroecological services in mind explicitly, it implicitly demonstrated an important conservation practice that can lead to additional water resources conservation that can contribute to the agroecological services for other vegetation services and habitats. Au cours

de trois années, l'ETc du maïs en système DT (2 091 mm) a été supérieure de 92 mm à celle de l'ETc du maïs en système NT (1 999 mm). Une tendance saisonnière et mensuelle a été observée concernant l'écart d'ETc entre les systèmes DT et NT. Au cours des trois campagnes agricoles, le maïs en système NT a consommé moins d'eau avant la floraison (anthèse) et davantage après la floraison que le maïs en système DT. Le rendement du maïs a été plus élevé en système DT qu'en système NT durant les trois années, de 7% (0,8 t/ha), 6% (0,8 t/ha) et 10% (1,2 t/ha) en 2011, 2012 et 2013, respectivement. Bien que ces recherches n'aient pas été explicitement conçues en tenant compte des services agroécologiques, elles ont mis en évidence, de manière implicite, une pratique de conservation importante susceptible de favoriser une meilleure conservation des ressources en eau et de contribuer ainsi aux services agroécologiques liés aux services de végétation et aux habitats. Kukal et Irmak (2021) ont examiné les effets exercés par l'AC sur la capacité de rétention d'eau du sol et les économies d'eau, en constatant que les effets variaient selon les pratiques de gestion et les conditions agroécologiques. Kienzler et al. (2012) ont démontré que l'AC en conditions irriguées en Asie centrale modifiait les modes de consommation de l'eau, tandis que Mohammad et al. (2018) ont constaté une réduction de la consommation d'eau par la culture du riz en semis direct sous AC dans les plaines indo-gangétiques. Cependant, ces études n'ont pas été conçues dans un cadre agroécologique explicite, et les effets interactifs entre des stratégies spécifiques d'irrigation et de drainage (par exemple, irrigation déficitaire, irrigation d'appoint, drainage contrôlé) et des pratiques spécifiques d'AC (par exemple, les espèces de cultures de couverture, la gestion des résidus, l'intensité du travail du sol) restent mal quantifiées selon la diversité des types de sols, des climats et des systèmes de culture. Il est nécessaire de mener des expérimentations ainsi que des travaux de modélisation systématiques sur le terrain pour : (i) la détermination de manière dont les pratiques d'agriculture de conservation (AC) modifient la dynamique eau-sol, nécessitant ainsi des ajustements dans la planification de l'irrigation; (ii) la quantification des gains (ou pertes) de productivité de l'eau résultant de la combinaison de l'AC et de l'irrigation de précision ; et (iii) l'identification des conditions dans lesquelles l'AC peut réduire la demande en eau d'irrigation sans compromettre la stabilité des rendements face à la variabilité climatique.

Priorité 6: Modernisation des infrastructures d'irrigation et de drainage en vue de la multifonctionnalité et de la prestation de services écosystémiques

La plupart des infrastructures d'irrigation et de drainage mondiales ont été conçues en tenir en compte un seul objectif : la fourniture de l'eau aux cultures ou l'évacuation des eaux excédentaires des parcelles. Le concept d'infrastructure multifonctionnelle — qui consiste à concevoir et à gérer des systèmes d'irrigation et de drainage pour fournir de l'eau à l'agriculture tout en assurant simultanément des services écosystémiques, en soutenant la biodiversité, en régulant les crues et en séquestrant le carbone — est encore un domaine assez récent. La feuille de route de la Vision CIID 2030 (CIID, 2017) a reconnu les principes de gestion intégrée de l'eau, d'innovation et de gouvernance qui s'alignent sur les principes agroécologiques, mais la mise en œuvre concrète de ces principes dans la conception et la gestion des infrastructures reste un défi à relever. La base de données probante devrait établir un lien entre la performance hydraulique et les résultats concernant les plans écologique, social et de la gouvernance. Il est nécessaire de mener des recherches sur: (i) l'élaboration des critères de conception et des indicateurs de performance pour des infrastructures d'irrigation et de drainage multifonctionnelles ; (ii) l'évaluation des coûts et des avantages de la modernisation des infrastructures existantes en vue de fournir des services écosystémiques; et (iii) l'étude des dispositions de gouvernance et de financement requis pour soutenir une modernisation des infrastructures servant à la fois la production agricole et les objectifs agroécologiques.

Raison pour laquelle le Congrès de la CIID doit combler cette lacune

Le 26^e Congrès de la CIID des irrigations et du drainage, qui se tiendra à Marseille, offre une plateforme unique et opportune pour combler les lacunes en matière de connaissances entre l'irrigation/drainage et, et ce, pour plusieurs raisons :

- Tout d'abord, la CIID est l'organisation professionnelle de renommée internationale, leader historique dans les domaines de l'irrigation, du drainage et de la gestion des inondations, ayant une adhésion de plus de 90 pays. Sa capacité de mobilisation lui permet de réunir les communautés de l'irrigation et de l'agroécologie comme peu d'autres plateformes peuvent le faire.
- Deuxièmement, le thème du Congrès invite explicitement les chercheurs, les praticiens et les décideurs à explorer la manière dont l'irrigation, le drainage et les solutions d'eau fondées sur la nature — lorsqu'ils sont guidés par des principes agroécologiques — peuvent aider à construire des systèmes durables, des systèmes alimentaires inclusifs et résistants pour nourrir la population mondiale en croissance rapide. Lorsque ces deux disciplines cruciales et interconnectées (irrigation/drainage et agroécologie) sont envisagées conjointement, elles permettent de rechercher des solutions de gestion pratiques visant à minimiser les impacts négatifs du changement climatique sur la productivité agroécologique, afin de soutenir la production alimentaire et de fibres. Cette approche permet déjà de surmonter le fossé disciplinaire, une nécessité plus impérieuse que jamais.
- Troisièmement, la feuille de route de la Vision CIID 2030 reconnaît les principes de gestion intégrée de l'eau, d'innovation, de partage des connaissances, d'équité et de gouvernance qui sont partagés avec les 13 principes de l'agroécologie (CIID, 2017; Wezel et al., 2020). Il s'agit d'un alignement structurel, et pas simplement thématique.
- Quatrièmement, le Congrès se réunit à un moment où le changement climatique redéfinit, de manière difficile, le contexte de l'irrigation et du drainage repositionnés. Le sixième rapport d'évaluation du GIEC (2023) a clairement indiqué que l'adaptation progressive est insuffisante; une transformation profonde des systèmes alimentaires est nécessaire. L'irrigation et le drainage, repositionnés dans un cadre agroécologique, peuvent et doivent faire partie de cette transformation.
- Enfin, le Congrès peut catalyser la démarche de la recherche. Les six priorités de recherche identifiées ci-dessus nécessitent une recherche coordonnée, multidisciplinaire et à plusieurs échelles que le réseau CIID est particulièrement bien positionnée pour mobiliser — reliant les ingénieurs en irrigation, les agronomes, les hydrologues, les écologistes, les spécialistes en sciences sociales et les décideurs politiques de tous les pays et contextes. L'équipe de Question 66 est bien positionnée pour soutenir une telle intégration dans les domaines de l'ingénierie, de l'agronomie, de l'hydrologie, de l'écologie, des sciences sociales et de la politique.

Conclusion

Les liens entre l'agroécologie et l'irrigation et le drainage restent profondément sous-explorés : en avril 2023, seuls 38 articles scientifiques les relient explicitement de manière explicite, et la plupart d'entre eux le faisaient de manière superficielle (Leauthaud et al., 2025) et sans avoir une compréhension complète de leur interconnexion en ce qui concerne la durabilité de la productivité agricole, la sécurité alimentaire ainsi que les services agroécologiques. Cette rareté représente à la fois un écart et une opportunité. La lacune réside dans le fait

que les agriculteurs, les décideurs et les chercheurs ne disposent pas de la base de données nécessaire pour concevoir des systèmes d'irrigation et de drainage contribuant activement aux transitions agroécologiques. L'opportunité offre l'ouverture du domaine à la recherche innovante et d'intégration qui peut redéfinir le rôle joué par la gestion de l'eau dans les systèmes alimentaires durables.

Le changement climatique rend cette réconciliation urgente. L'irrigation et le drainage doivent être évalués le long d'un continuum allant des infrastructures « grises » conventionnelles aux mesures hybrides et fondées sur les écosystèmes; seules ces deux dernières catégories peuvent être qualifiées comme des solutions fondées sur la nature, dès lors que leurs bénéfices écologiques et sociaux sont démontrés. Le concept d'irrigation multiservice (Leauthaud et Leenhardt, 2025) fournit un cadre conceptuel précieux pour ce repositionnement, tandis que les six priorités de recherche que nous proposons dans cet article traduisent ce concept en une démarche pratique fondée sur les défis technologiques, hydrologiques, institutionnels et écologiques auxquels est confrontée au quotidien la communauté mondiale de l'irrigation et du drainage.

Le 26e Congrès de la CIID (Commission internationale de l'irrigation et du drainage) à Marseille est constaté à marquer un tournant décisif dans cette démarche. En réunissant les communautés de l'irrigation et de l'agroécologie, ce congrès peut catalyser les innovations en matière de recherche, de politiques et de pratiques nécessaires pour faire de la gestion de l'eau agricole, de la production agricole et des pratiques de gestion associées une composante transformatrice et intégrante de la transition agroécologique, afin de construire des systèmes alimentaires non seulement productifs et économes en eau, mais aussi écologiquement fondés, socialement équitables et résistants face au climat.

Références

- Akakpo, K., S. Bouarfa, M. Benoit, and C. Leauthaud. 2021. Challenging agroecology through the characterization of farming practices' diversity in Mediterranean irrigated areas. *European Journal of Agronomy* 128: 126284. doi: 10.1016/j.eja.2021.126284.
- Alletto, L., Cueff, S., Bréchémie, J., Lachaussee, M., Derrouch, D., Page, A., ... & Bustillo, V. (2022). Physical properties of soils under conservation agriculture: A multi-site experiment on five soil types in south-western France. *Geoderma*, 428, 116228.
- Altieri, M.A. 1992. Agroecological foundations of alternative agriculture in California. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 39(1–2): 23–53. doi: 10.1016/0167-8809(92)90203-N.
- Ameur, F., and C. Leauthaud. 2024. Assessing the integration of agroecological principles in smallholder farming systems in North African irrigated plains. *Agroecology and Sustainable Food Systems*. doi: 10.1080/21683565.2024.2417266.
- Basche, A.D., and O.F. Edelson. 2017. Improving water resilience with more perennially based agriculture. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 41(7): 799–824. doi: 10.1080/21683565.2017.1330795.
- Çakmakçı, R., S. Çakmakçı, and M.F. Çakmakçı. 2025. Principles of environmentally sustainable agriculture for building resilient and resource-efficient food systems. *Turkish Journal of Biology* 49(5): 550–584. doi: 10.55730/1300-0152.2764.
- Christianson, L., A. Brij, A. Carvalho, and J. Helmers. 2017. Reducing nitrogen contamination from agricultural subsurface drainage with denitrification bioreactors and controlled drainage. *Biosystems Engineering* 153: 1–10.
- Das, A., and S. Mishra. 2025. Smart and sustainable water management: policy, technology, and innovation pathways for resource resilience. *Green Technology, Resilience and Sustainability* 5 (2025). <https://doi.org/10.1007/s44173-025-00022-8>
- Devkota, M., K.P. Devkota, M. Karrou, and V. Nangia. 2023. Genotype and agronomic management interaction to enhance wheat yield and water use efficiency in the Mediterranean rainfed environment of Morocco: I. Field data analysis. *European Journal of Agronomy* 151: 126972. doi: 10.1016/j.eja.2023.126972.
- D'Acunha, B., et al. 2026. Drained agricultural peatlands as persistent carbon sources. (PMC12970578) — a review of drained organic soils as carbon sources.

- W.M. Denevan. 2003. *Cultivated Landscapes of Native Amazonia and the Andes* Oxford University Press.
- Devkota, K.P., M. Devkota, M. Mabhaudhi, V. Nangia, S. Attaher, R.J. Boroto, J. Timsina, and K.H. Siddique. 2025. A blueprint for building resilience and food security in MENA and SSA drylands: Diversifying agriculture with neglected and underutilized species. *Food and Energy Security* 14(1): e70046. doi.org/10.1002/fes3.70046.
- FAO. 2018. *The 10 Elements of Agroecology: Guiding the Transition to Sustainable Food and Agricultural Systems*. FAO. Rome, Italy.
- FAO. 1996. *Food production: the critical role of water*. Technical Background Document. FAO. Rome, Italy.
- Fischer, K., G. Vico, H. Röcklinsberg, H. Liljenström, and R. Bommarco. 2025. Progress towards sustainable agriculture hampered by siloed scientific discourses. *Nature Sustainability* 8: 66–74.
- Galeana-Pizana, J.M., S. Couturier, D. Figueroa, and A.D. Jimenez. 2021. Is rural food security primarily associated with smallholder agriculture or with commercial agriculture? *Agricultural Systems* 190: 103091. doi: 10.1016/j.agsy.2021.103091.
- Grafton, R.Q., J. Williams, C.J. Perry, F. Müller, C. Ringler, A. Steduto, B. Udall, S.A. Wheeler, Y. Wang, D. Garrick, and S.M. Allen. 2018. The paradox of irrigation efficiency. *Science* 361(6404): 748–750. doi: 10.1126/science.aat9314.
- Gross, B., and R. Jaubert. 2019. Vegetable gardening in Burkina Faso: drip irrigation, agroecological farming and the diversity of smallholders. *Water Alternatives* 12(1): 46–67.
- Guzman, G.I., and A.M. Alonso. 2008. A comparison of energy use in conventional and organic olive oil production in Spain. *Agricultural Systems* 98(3): 167–176. doi: 10.1016/j.agsy.2008.06.004.
- Han, S., F. Tian, Y. Liu, and X. Duan. 2017. Socio-hydrological perspectives of the co-evolution of humans and groundwater in Cangzhou, North China Plain. *Hydrology and Earth System Sciences* 21: 3619–3633. doi: 10.5194/hess-21-3619-2017.
- HLPE. 2019. *Agroecological and Other Innovative Approaches for Sustainable Agriculture and Food Systems That Enhance Food Security and Nutrition*. HLPE Report #14. Rome: Committee on World Food Security.
- ICID. 2017. *A Water Secure World Free of Poverty and Hunger: A Roadmap to ICID Vision 2030*. New Delhi: ICID.
- Irmak, S., S. Irmak and J. Kaur. 2025. Sprayable bio-based polymer conserved soil-water, enhanced soybean growth, moderated soil temperature, increased soil organic matter content and reduced giant foxtail [*Setaria faberi* hermm.] density and biomass. *Applied Engineering in Agriculture*. 41(6):695-706. https://doi.org/10.13031/aea.16439.
- Irmak, S., J. Aguilar, V. Adamchuk, H. Huang, S. O'shaughnessy, M. Kukal, I. Kisekka, D. Porter, M. Andrade-Rodriguez, A. Yari, C. Madramootoo. 2025. Precision Irrigation Management. The Council for Agricultural Science and Technology (CAST) Paper. pp. 1-21. https://doi.org/10.62300/6b9hf011.
- Irmak, S., T.A. Hinn, M.S. Kukal and A.T. Mohammed. 2025. Concurrent response of soybean to fixed (full and limited) and variable rate irrigation management in three soil types: I. Soil water dynamics. *Irrigation and Drainage*. 74:1853–1873. https://doi.org/10.1002/ird.3124.
- Irmak, S., and T.A. Hinn. 2025. Concurrent response of soybean to fixed (full and limited) and variable rate irrigation management in three soil types: II. Growth, yield, evapotranspiration and water productivity. *Irrigation and Drainage*. 74:1874–1888. https://doi.org/10.1002/ird.3121.
- Irmak, S. 2024. Maize response to different subsurface drip irrigation management strategies: Yield, production functions, basal and crop evapotranspiration. *Agricultural Water Management* 300 (2024) 108927. doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108927.
- Irmak, S., S. Irmak and J. Kaur. 2024. Effect of sprayable biobased polymers on soybean growth and yield, weed suppression, soil temperature, soil-water, evapotranspiration and soil quality variables. *Journal of Natural Resources and Agricultural Ecosystems*. 2(4):227-242. https://doi.org/10.13031/jnrae.16177.
- Irmak, S. 2023. Agriculture and agricultural water management: Historical perspectives and integration of research and extension/outreach for large-scale technology adoption in production fields. *Journal of ASABE*. 66(1):167-192. https://doi.org/10.13031/ja.15272.

- Irmak, S., A.T. Mohammed and M. Drudik. 2023. Maize nitrogen (N) uptake, grain N concentration and root-zone residual nitrate N (NO₃-N) response under center pivot, subsurface drip and surface (furrow) irrigation. *Agricultural Water Management* 287(2023):108421. doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108421.
- Irmak, S., and A.T. Mohammed. 2023. Maize nitrogen uptake and use efficiency, partial factor productivity of nitrogen, and yield response to different nitrogen and water applications under three irrigation methods. *Irrigation and Drainage*. 73:64-88. https://doi.org/10.1002/ird.2868.
- Irmak, S., A.T. Mohammed and M.S. Kukal. 2022. Maize response to coupled irrigation and nitrogen fertilization under center pivot, subsurface drip and surface or gravity (furrow) irrigation: Growth, development and productivity. *Agricultural Water Management*. 263(2022):107457. doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107457.
- Irmak, S., M.S. Kukal, A.T. Mohammed and K. Djaman. 2019. Disk-till vs. no-till maize evapotranspiration, microclimate, grain yield, production functions and water productivity. *Agricultural Water Management*. 26(5):177-195. doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.006.
- Irmak, S., V. Sharma, A.T. Mohammed and K. Djaman. 2018. Impacts of cover crops on soil physical properties: Field capacity, permanent wilting point, soil-water holding capacity, bulk density, hydraulic conductivity and infiltration. *Transactions of the ASABE*. 61(4):1307-1321. doi.org/10.13031/trans.12700.
- Irmak, S., and K. Djaman. 2016. Effects of planting date and density on plant growth, yield, evapotranspiration, and irrigation- and evapotranspiration-yield production functions of maize (*Zea mays* L.) under subsurface drip irrigation and rainfed conditions. *Transactions of the ASABE*. 59(5):1235-1256. doi:10.13031/trans.59.11169.
- Irmak, S., J.E. Specht, L. Odhiambo, J.M. Rees and K.G. Cassman 2015. Soybean yield, water productivity, evapotranspiration and soil-water extraction response to subsurface drip irrigation. *Transactions of the ASABE*. 57(3):729-748. doi:10.13031/trans.57.10085.
- Irmak, S. 2015. Inter-annual variation in long-term center pivot-irrigated maize evapotranspiration (ET) and various water productivity response indices: Part I. Grain yield, actual and basal ET, irrigation-yield production functions, ET-yield production functions, and yield response factors. *J. Irrigation and Drainage Engineering*. 141(5):1-17. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000825.
- IPCC. 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Geneva: IPCC. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- Kawasaki, K., Ide, K., Yamamuro, N., Oda, T., Matsumura, A., Noda, K., Hanasaki, N., Hirabayashi, Y. 2024. Considering the irrigation canal network in Japan: an attempt to model inter-basin water conveyance. *Japanese Journal of JSCE* 80(16): 1-7. doi:10.2208/jscej.23-16095.
- Kienzler, K.M., J.P.A. Lamers, A. McDonald, A. Mirzabaev, N. Ibragimov, O. Egamberdiev, E. Ruzibaev, and A. Akramkhanov. 2012. Conservation agriculture in Central Asia—What do we know and where do we go from here? *Field Crops Research* 132: 95–105. doi: 10.1016/j.fcr.2011.12.008.
- Kröger, R. et al. 2023. A review of ecosystem services from edge-of-field practices in tile-drained agricultural landscapes. *Journal of Environmental Management* 348: 119220. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119220.
- Kukal, M.S., and S. Irmak. 2021. Conservation agriculture effects on soil water holding capacity and water-saving varied with management practices and agroecological conditions: A review. *Agriculture* 11(9): 1681. doi: 10.3390/agriculture11091681.
- Leauthaud, C., F. Ameur, and D. Leenhardt. 2025. Irrigation and agroecology: a scientific mismatch? A literature review. *Agroecology and Sustainable Food Systems*. 49(9), 1415–144. doi: 10.1080/21683565.2025.2481405.
- Leauthaud, C., and D. Leenhardt. 2025. Towards multiservice irrigation for an agroecological future. *npj Sustainable Agriculture* 3: 55. doi: 10.1038/s44264-025-00094-w.
- Leauthaud, C., F. Ameur, A. Richa, J. Ben Yahmed, N. Tadjer, S. Bakouchi, K. Akakpo, M. Djezzar, and H. Amichi. 2022a. Production and use of homemade dry manure-based tea in fertigation systems in North Africa. *Renewable Agriculture and Food Systems* 37(3): 248–256. doi: 10.1017/S174217052100051X.
- Leauthaud, C., J. Ben Yahmed, M. Husseini, F. Rezgui, and F. Ameur. 2022b. Adoption factors and structural characteristics of irrigated olive grove agroforestry systems in Central Tunisia. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 46(7): 1025–1046. doi: 10.1080/21683565.2022.2085230.

- Liniger, H., Mekdaschi Studer, R., 2019. Sustainable Rangeland Management in Sub-Saharan Africa: Guidelines to Good Practice (No. 138574), HP and Mekdaschi Studer, R. The World Bank.
- Liu, D., F. Tian, M. Lin, and M. Sivapalan. 2015. A conceptual socio-hydrological model of the co-evolution of humans and water: Case study of the Tarim River basin, western China. *Hydrology and Earth System Sciences* 19: 1035–1054. doi: 10.5194/hess-19-1035-2015.
- Liu, Y., F. Tian, H. Hu, and M. Sivapalan. 2014. Socio-hydrologic perspectives of the co-evolution of humans and water in the Tarim River basin, Western China: The Taiji–Tire model. *Hydrology and Earth System Sciences* 18: 1289–1303. doi: 10.5194/hess-18-1289-2014.
- Lu, Y., F. Tian, L. Guo, et al. 2021. Socio-hydrologic modeling of the dynamics of cooperation in the transboundary Lancang–Mekong River. *Hydrology and Earth System Sciences* 25: 1883–1903. doi: 10.5194/hess-25-1883-2021.
- Mdee, A., A. Wostry, A. Coulson, and J. Maro. 2019. A pathway to inclusive sustainable intensification in agriculture? Assessing evidence on the application of agroecology in Tanzania. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 43(2): 201–227. doi: 10.1080/21683565.2018.1485126.
- Mekdaschi, R. and Liniger, H.P., 2013. Water harvesting: guidelines to good practice.
- Mitchell, M. E., Newcomer-Johnson, T., Christensen, J., Crumpton, W., Dyson, B., Canfield, T. J., ... & Forshay, K. J. (2023). A review of ecosystem services from edge-of-field practices in tile-drained agricultural systems in the United States Corn Belt Region. *Journal of environmental management*, 348, 119220.
- Mohammad, A., S. Sudhishri, T.K. Das, M. Singh, R. Bhattacharyya, A. Dass, M. Khanna, V.K. Sharma, N. Dwivedi, and M. Kumar. 2018. Water balance in direct-seeded rice under conservation agriculture in north-western Indo-Gangetic Plains of India. *Irrigation Science* 36(6): 381–393. doi: 10.1007/s00271-018-0590-z.
- Mohammed, A.T., and S. Irmak. 2022. Maize response to irrigation and nitrogen under center pivot, subsurface drip and furrow irrigation: Water productivity, production functions, basal evapotranspiration and yield response factors. *Agricultural Water Management*. 271(2022), 107795. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107795>.
- Moraine, M., J. Grimaldi, C. Murgue, M. Duru, and O. Therond. 2016. Co-design and assessment of cropping systems for developing crop-livestock integration at the territory level. *Agricultural Systems* 147: 87–97. doi: 10.1016/j.agry.2016.06.002.
- Murgia, I., Beltrami, S., Villani, L., Vaglia, V., Alderotti, F., Angeloni, G., ... & Piemontese, L. (2026). The challenge of science for sustainable agriculture: an Italian early career researchers' perspective. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 50(7), 1595-1603.
- Nangia, V., T. Oweis, F.H. Kemeze, and J. Schnetzer. 2018. Supplemental Irrigation: A Promising Climate-Smart Practice for Dryland Agriculture. *Climate-Smart Agriculture Practice Brief*. CGIAR CCASF.
- Nhamo, L., et al. 2025. Transforming agricultural water management through the Water–Energy–Food Nexus: Trends, opportunities, barriers and solutions. *Irrigation and Drainage* 2025; 0:1–1. <https://doi.org/10.1002/ird.70032>.
- Nika, C.E., V. Vasilaki, A. Expósito, and E. Katsou. 2020. Water cycle and circular economy: developing a circularity assessment framework for complex water systems. *Water Research* 187: 116423. doi: 10.1016/j.watres.2020.116423.
- Okiria, E., K. Noda, M.K. Zaki, and T. Okayasu. 2021. A review of payment for ecosystem services (PES) in agricultural water: Are PES from the operation of agricultural water control structures ubiquitous? *Sustainability* 13(22): 12624. doi: 10.3390/su132212624.
- Ostrom, E. 1993. Design principles in long-enduring irrigation institutions. *Water Resources Research* 29(7): 1907–1912.
- Otsuka, K., Nishimura, S., Senge, M., Noda, K. 2025. Urbanization impacts on operational efforts of agricultural water infrastructure. *Hydrological Research Letters*, 19: 283-288. doi: 10.3178/hrl.25-00030.
- Pahl-Wostl, C., E. Mostert, and D. Tàbara. 2008. The growing importance of social learning in water resources management and sustainability science. *Ecology and Society* 13(1): 1-4. <https://www.jstor.org/stable/26267907>.

- Payero, J.O., D.D. Tarkalson and S. Irmak, D. Davison, and J.L. Petersen. 2008. Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semi-arid climate. *Agricultural Water Management*. 95:895-908.
- Perez Neira, D. 2016. Energy efficiency of cacao agroforestry under traditional and organic management. *Agronomy for Sustainable Development* 36(49). doi: 10.1007/s13593-016-0386-6.
- Piemontese, L., G. Castelli, I. Fetzer, J. Barron, H. Liniger, N. Harari, E. Bresci, and G. Cecchi. 2020. Estimating the global potential of water harvesting from successful case studies. *Global Environmental Change* 63: 102121. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102121.
- Pörtner, H.-O. et al. 2022. Technical summary. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009325844.002.
- Rasmussen, L.V. et al. 2024. Joint environmental and social benefits from diversified agriculture. *Science* 384(6691): 87–93. doi: 10.1126/science.adj19
- Romero, P., J.M. Navarro, and P.B. Ordaz. 2022. Towards a sustainable viticulture: the combination of deficit irrigation strategies and agroecological practices in Mediterranean vineyards. A review and update. *Agricultural Water Management* 259: 107216. doi: 10.1016/j.agwat.2021.107216.
- Rouge, A., G. Adeux, H. Busset, R. Hugard, J. Martin, A. Matejcek, D. Moreau, J.P. Guillemain, and S. Cordeau. 2022. Weed suppression in cover crop mixtures under contrasted levels of resource availability. *European Journal of Agronomy* 136: 126499. doi: 10.1016/j.eja.2022.126499.
- Science Council of Japan. 2001. Report on the Evaluation of Multifunctional Roles of Agriculture and Forestry Contributed to Global Environment and Human Life (Response to the Ministerial Inquiry). Science Council of Japan, Tokyo, Japan. (in Japanese).
- Sharda, V., R. Bajwa, G. Shekhar, and S. Irmak. 2022. Evaluating spatial and temporal variations in sub-field level crop water stress for variable rate irrigation. *Frontiers in Agronomy* 4: 983244. doi: 10.3389/fagro.2022.983244.
- Sharma, V and S. Irmak. 2021a. Comparative analyses of variable and fixed rate irrigation and nitrogen management for maize in different soil types: Part I. Impact on soil-water dynamics and crop evapotranspiration. *Agric. Water Manage.*, 245 (28) (2021), Article 106644, 10.1016/j.agwat.2020.106644
- Sharma, V and S. Irmak. 2021b. Comparative analyses of variable and fixed rate irrigation and nitrogen management for maize in different soil types: Part II. Growth, grain yield, evapotranspiration, production functions and water productivity. *Agric. Water Manag.*, 246 (2021), 10.1016/j.agwat.2020.106653
- Sharma, V., and S. Irmak. 2020. Economic comparisons of variable rate irrigation and fertigation with fixed (uniform) rate irrigation and fertigation and pre-plant fertilizer management for maize. *Agricultural Water Management* 240: 106307. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106307.
- Sietz, D., Frey, U., Roggero, M., Gong, Y., Magliocca, N., Tan, R., Janssen, P. and Václavík, T., 2019. Archetype analysis in sustainability research. *Ecology and Society*, 24(3).
- Skaggs, R.W., M.A. Youssef, and G.M. Chescheir. 2012. DRAINMOD: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 55(4): 1509–1522. doi: 10.13031/2013.42259.
- Tardieu, H. 2005. Irrigation and drainage services: some principles and issues towards sustainability. An ICID position paper. *Irrigation and Drainage* 54: 251–262.
- Stroosnijder, L. (2009). Modifying land management in order to improve efficiency of rainwater use in the African highlands. *Soil and Tillage Research*, 103(2), 247-256.
- Tarolli, P., Liu, G., Castelli, G., Bresci, E., Bailly, J.S., Rizzo, D., Loc, H.H., Sidle, R.C. and Bogaard, T., 2025. Nature-based solutions for soil and water conservation in an era of climate extremes: Limitations and future scenarios. *International Soil and Water Conservation Research*.
- Tarolli, P., G. Castelli, et al. 2026. Nature-based solutions for soil and water conservation in an era of climate extremes: Limitations and future scenarios. *International Soil and Water Conservation Research* 14(2): 100604. doi: 10.1016/j.iswcr.2025.12.004.
- Tian, F., J. Wei, M. Haeflner, and H. Kreibich, eds. 2026. *Coevolution and Prediction of Coupled Human-Water Systems: A Sociohydrologic Synthesis of Change in Hydrology and Society*. Elsevier. ISBN 978-0-443-41736-8.

- Timpanaro, G. et al. 2026. Regulatory frameworks and policy innovations for agroecology in the Mediterranean basin. *Land Use Policy* 108001. doi: 10.1016/j.landusepol.2026.108001.
- Van der Laan, M., Virtanen, S., Matsuno, Y., Castelli, G., Fayrap, A., Cresswell, R., & Hsieh, M. K. (2024). Ecosystem services of irrigated and controlled drainage agricultural systems: A contemporary global perspective. *Irrigation and Drainage*, 73(5), 1823-1837.
- Villani, L., and G. Castelli. 2025. Large dams and small reservoirs: co-modeling water storage strategies in a Mediterranean catchment under a changing climate. *Frontiers in Water* 7: 1673203. doi: 10.3389/frwa.2025.1673203.
- Villani, L., Castelli, G., Forzini, E., Piemontese, L., Lucca, E., Bouizrou, I., ... & Bresci, E. (2025). Large dams and small reservoirs: co-modeling water storage strategies in a Mediterranean catchment under a changing climate. *Frontiers in Water*, 7, 1673203.
- Wei, J., Y. Wei, F. Tian, Y. Xiong, and H. Hu. 2023. Transition in the societal value and governance of water resources in Australia and China. *Humanities and Social Sciences Communications* 10: 359. doi: 10.1057/s41599-023-01857-x.
- Wezel, A., M. Casagrande, F. Celette, J.-F. Vian, A. Ferrer, and J. Peigne. 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture: A review. *Agronomy for Sustainable Development* 34(1): 1–20. doi: 10.1007/s13593-013-0180-7.
- Wezel, A., B.G. Herren, R.B. Kerr, E. Barrios, A.L.R. Gonçalves, and F. Sinclair. 2020. Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems: A review. *Agronomy for Sustainable Development* 40(6): 40. doi: 10.1007/s13593-020-00646-z.
- World Bank. 2025. Repurposing Agricultural Support: 2025 Policy Compendium. Washington, DC: World Bank.
- Xue, R., Y. Jiang, H. Li, and B. Shi. 2025. Review of advancements and challenges in delayed irrigation: Enhancing crop water productivity and sustainable crop production. *Agricultural Water Management* 318: 109739. doi: 10.1016/j.agwat.2025.109739.
- Yonts, C.D., A. Haghverdi, D.L. Reichert and S. Irmak. 2018. Deficit irrigation and surface residue cover effects on dry bean yield, in-season soil water content and irrigation water use efficiency in western Nebraska High Plains. *Agricultural Water Management*. 199:138-147. doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.024.
- Zhang, Z., H. Hu, F. Tian, X. Yao, and M. Sivapalan. 2014. Groundwater dynamics under water-saving irrigation and implications for sustainable water management in an oasis: Tarim River basin of western China. *Hydrology and Earth System Sciences* 18: 3951–3967. doi: 10.5194/hess-18-3951-2014.
- Zhao, H., F. Tian, et al. 2026. Climate change and irrigation expansion reshape the water pressure and upstream–downstream interactions in the Lancang–Mekong River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences* 30: 2433–2453. doi: 10.5194/hess-30-2433-2026.
- Zwarteveen, M. et al. 2021. Transformations to groundwater sustainability: from individuals and pumps to communities and aquifers. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 49: 88–97.



